Apostila de

Soldagem MIG/MAG

MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE METAL 4
EQUIPAMENTOS Soldagem manual 7
SUPRIMENTO DE ENERGIA 10
GASES DE PROTEÇÃO 14
ARAMES 23
SEGURANÇA 29
TÉCNICAS E PARÂMETROS DE SOLDAGEM 32
CONDIÇÕES DE SOLDAGEM 43
DEFEITOS DE SOLDA 56
SOLDAGEM MIG/MAG PONTUAL 62
BIBLIOGRAFIA 67

Traduzido e adaptado por Cleber Fortes – Engenheiro Metalúrgico, MSc.
Assistência Técnica Consumíveis – ESAB BR
Revisado por Cláudio Turani Vaz – Engenheiro Metalurgista, MSc.
Assistência Técnica – ESAB BR
Última revisão em 25 de janeiro de 2005

INTRODUÇÃO

Na soldagem ao arco elétrico com gás de proteção (GMAW – Gas Metal Arc Welding), também conhecida como soldagem MIG/MAG (MIG – Metal Inert Gas e MAG – Metal Active Gas), um arco elétrico é estabelecido entre a peça e um consumível na forma de arame. O arco funde continuamente o arame à medida que este é alimentado à poça de fusão. O metal de solda é protegido da atmosfera pelo fluxo de um gás (ou mistura de gases) inerte ou ativo. A Figura 1 mostra esse processo e uma parte da tocha de soldagem.

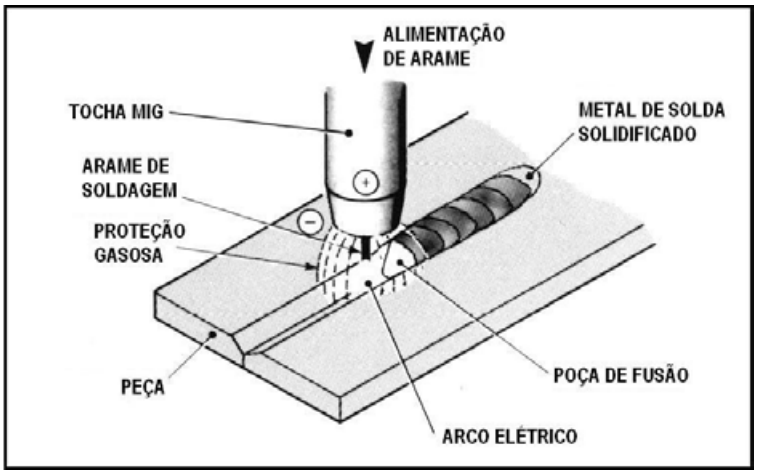


Figura 1 – Processo básico de soldagem MIG/MAG

O conceito básico de GMAW foi introduzido nos idos de 1920, e tornado comercialmente viável após 1948. Inicialmente foi empregado com um gás de proteção inerte na soldagem do alumínio. Consequentemente, o termo soldagem MIG foi inicialmente aplicado e ainda é uma referência ao processo. Desenvolvimentos subsequentes acrescentaram atividades com baixas densidades de corrente e correntes contínuas pulsadas, emprego em uma ampla gama de materiais, e o uso de gases de proteção reativos ou ativos (particularmente o dióxido de carbono, CO_2) e misturas de gases. Esse desenvolvimento posterior levou à aceitação formal do termo GMAW – Gas Metal Arc Welding para o processo, visto que tanto gases inertes quanto reativos são empregados. No entanto, quando se empregam gases reativos, é muito comum usar o termo soldagem MAG (MAG – Metal Active Gas).

O processo de soldagem funciona com corrente contínua (CC),

normalmente com o arame no pólo positivo. Essa configuração é conhecida como polaridade reversa. A polaridade direta é raramente utilizada por causa da transferência deficiente do metal fundido do arame de solda para a peça. São comumente empregadas correntes de soldagem de 50 A até mais que 600 A e tensões de soldagem de 15 V até 32 V. Um arco elétrico autocorrigido e estável é obtido com o uso de uma fonte de tensão constante e com um alimentador de arame de velocidade constante.

Melhorias contínuas tornaram o processo MIG/MAG aplicável à soldagem de todos os metais comercialmente importantes como os aços, o alumínio, aços inoxidáveis, cobre e vários outros. Materiais com espessura acima de 0,76 mm podem ser soldados praticamente em todas as posições.

É simples escolher equipamento, arame, gás de proteção e condições de soldagem capazes de produzir soldas de alta qualidade com baixo custo.

Vantagens:

O processo de soldagem MIG/MAG proporciona muitas vantagens na soldagem manual e automática dos metais para aplicações de alta e baixa produção. Suas vantagens combinadas quando comparado ao eletrodo revestido, arco submerso e TIG são:

- a soldagem pode ser executada em todas as posições;
- não há necessidade de remoção de escória;
- alta taxa de deposição do metal de solda;
- tempo total de execução de soldas de cerca da metade do tempo se comparado ao eletrodo revestido;
- altas velocidades de soldagem; menos distorção das peças;
- largas aberturas preenchidas ou amanteigadas facilmente, tornando certos tipos de soldagem de reparo mais eficientes;
- não há perdas de pontas como no eletrodo revestido.

Capítulo 1

MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE METAL

Basicamente o processo MIG/MAG inclui três técnicas distintas de modo de transferência de metal: curto-circuito (short arc), globular (globular) e aerossol (spray arc). Essas técnicas descrevem a maneira pela qual o metal é transferido do arame para a poça de fusão. Na transferência por curto-circuito — short arc, dip transfer, microwire — a transferência ocorre quando um curto-circuito elétrico é estabelecido. Isso acontece quando o metal fundido na ponta do arame toca a poça de fusão. Na transferência por aerossol — spray arc — pequenas gotas de metal fundido são desprendidas da ponta do arame e projetadas por forças eletromagnéticas em direção à poça de fusão. A transferência globular — globular — ocorre quando as gotas de metal fundido são muito grandes e movem-se em direção à poça de fusão sob a influência da gravidade. Os fatores que determinam o modo de transferência de metal são a corrente de soldagem, o diâmetro do arame, o comprimento do arco (tensão), as características da fonte e o gás de proteção (veja a Figura 2).

Transferência por curto-circuito

Na soldagem com transferência por curto-circuito são utilizados arames de diâmetro na faixa de 0,8 mm a 1,2 mm, e aplicados pequenos comprimentos de arco (baixas tensões) e baixas correntes de soldagem. É obtida uma pequena poça de fusão de rápida solidificação. Essa técnica de soldagem é particularmente útil na união de materiais de pequena espessura em qualquer posição, materiais de grande espessura nas posições vertical e sobrecabeça, e no enchimento de largas aberturas. A soldagem por curto-circuito também deve ser empregada quando se tem como requisito uma distorção mínima da peça.

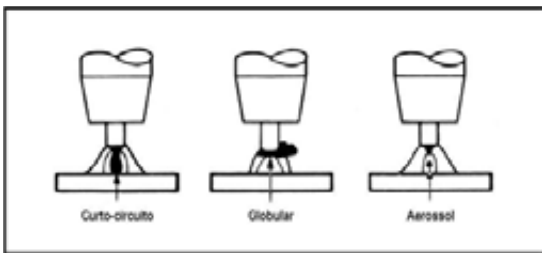


Figura 2 – Modos de transferência do metal de solda

O metal é transferido do arame à poça de fusão apenas quando há contato entre os dois, ou a cada curto-circuito. O arame entra em curto-circuito com a peça de 20 a 200 vezes por segundo.

A Figura 3 ilustra um ciclo completo de curto-circuito. Quando o arame toca a poça de fusão (A), a corrente começa a aumentar para uma corrente de curto-circuito. Quando esse valor alto de corrente é atingido, o metal é transferido. O arco é então reaberto. Como o arame está sendo alimentado mais rapidamente que o arco consegue fundi-lo, o arco será eventualmente extinguido por outro curto (I). O ciclo recomeça. Não há metal transferido durante o período de arco aberto, somente nos curtos-circuitos.

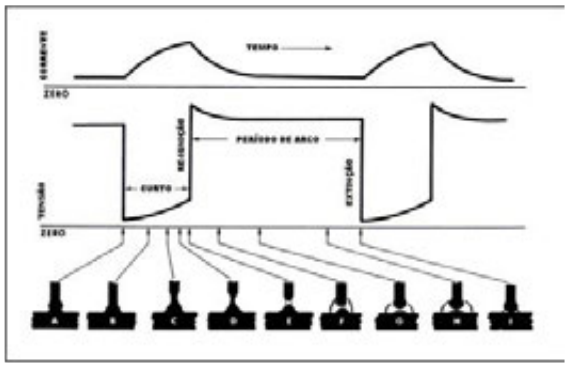


Figura 3 - Corrente-tensão versus tempo típico do ciclo de curto-circuito

Para garantir uma boa estabilidade do arco na técnica de curto-circuito devem ser empregadas correntes baixas. A Tabela I ilustra a faixa de corrente ótima para a transferência de metal por curto-circuito para vários diâmetros de arame. Essas faixas podem ser ampliadas dependendo do gás de proteção selecionado.

Diâmetro do arame		**Corrente de soldagem (A)**	
pol (")	mm	Mínima	Máxima
0,030	0,76	50	150
0,035	0,89	75	175
0,045	1,10	100	225

Tabela I - Faixa ótima de corrente de curto-circuito para vários diâmetros de arame.

Transferência globular

Quando a corrente e a tensão de soldagem são aumentadas para valores acima do máximo recomendado para a soldagem por curto-circuito, a transferência de metal começará a tomar um aspecto diferente. Essa técnica de soldagem é comumente conhecida como transferência globular, na qual o metal se transfere através do arco. Usualmente as gotas de metal fundido têm diâmetro maior que o do próprio arame. Esse modo de transferência pode ser errático, com respingos e curtos-circuitos ocasionais.

Soldagem por aerossol (spray)

Aumentando-se a corrente e a tensão de soldagem ainda mais, a transferência de metal torna-se um verdadeiro arco em aerossol (spray). A corrente mínima à qual esse fenômeno ocorre é chamada corrente de transição. A Tabela II mostra valores típicos de corrente de transição para vários metais de adição e gases de proteção. Conforme é observado nessa tabela, a corrente de transição depende do diâmetro do arame e do gás de proteção. Entretanto, se o gás de proteção para soldar aços carbono contiver mais que cerca de 15% de dióxido de carbono (CO_2), não haverá transição de transferência globular para transferência por aerossol.

A Figura 4 mostra a transferência fina e axial típica do arco em aerossol. As gotas que saem do arame são muito pequenas, proporcionando boa estabilidade ao arco. Curtos-circuitos são raros. Poucos respingos são associados com essa técnica de soldagem.

Tipo de arame	Diâmetro do Arame		Gás de proteção	Corrente mínima de aerossol (A)
	pol (")	mm		
Aço Carbono	0,030	0,76	98% Ar / 2% O_2	150
	0,035	0,89		165
	0,045	1,10		220
	0,052	1,30		240
	0,062	1,60		275
Aço Inoxidável	0,035	0,89	98% Ar / 1% O_2	170
	0,045	1,10		225
	0,062	1,60		285
Alumínio	0,030	0,76	Argônio	95
	0,046	1,19		135
	0,062	1,60		180
Cobre desoxidado	0,035	0,89	Argônio	180
	0,045	1,10		210
	0,062	1,60		310
Bronze ao Silício	0,035	0,89	Argônio	165
	0,045	1,10		205
	0,062	1,60		270

Tabela II - Corrente mínima para a soldagem por aerossol

A soldagem em aerossol pode produzir altas taxas de deposição do metal de solda. Essa técnica de soldagem é geralmente empregada para unir materiais de espessura 2,4 mm e maiores. Exceto na soldagem de alumínio ou cobre, o processo de arco em aerossol fica geralmente restrito apenas à soldagem na posição plana por causa da grande poça de fusão. No entanto, aços carbono podem ser soldados fora de posição usando essa técnica com uma poça de fusão pequena, geralmente com arames de diâmetro 0,89 mm ou 1,10 mm.

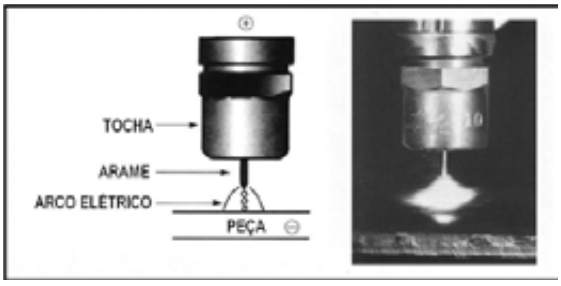


Figura 4 - Técnica de soldagem por arco em aerossol (spray)

Uma variação da técnica de arco em aerossol é conhecida como soldagem pulsada em aerossol. Nessa técnica, a corrente é variada entre um valor alto e um baixo. O nível baixo de corrente fica abaixo da corrente de transição, enquanto que o nível alto fica dentro da faixa de arco em aerossol. O metal é transferido para a peça apenas durante o período de aplicação de corrente alta. Geralmente é transferida uma gota durante cada pulso de corrente alta. A Figura 5 retrata o modelo de corrente de soldagem usado na soldagem pulsada em aerossol. Valores comuns de

frequência ficam entre 60 e 120 pulsos por segundo. Como a corrente de pico fica na região de arco em aerossol, a estabilidade do arco é similar à da soldagem em aerossol convencional. O período de baixa corrente mantém o arco aberto e serve para reduzir a corrente média. Assim, a técnica pulsada em aerossol produzirá um arco em aerossol com níveis de corrente mais baixos que os necessários para a soldagem em aerossol convencional. A corrente média mais baixa possibilita soldar peças de pequena espessura com transferência em aerossol usando maiores diâmetros de arame que nos outros modos. A técnica pulsada em aerossol também pode ser empregada na soldagem fora de posição de peças de grande espessura.

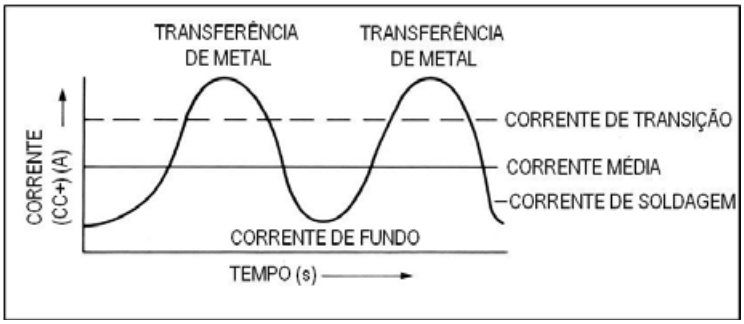


Figura 5 - Técnica de soldagem por arco pulsado em aerossol

Soldagem com arames tubulares

O arame tubular é um eletrodo contínuo de seção reta tubular, com um invólucro de aço de baixo carbono, aço inoxidável ou liga de níquel, contendo desoxidantes, formadores de escória e estabilizadores de arco na forma de um fluxo (pó). Ambos os materiais da fita e do núcleo são cuidadosamente monitorados para atender às especificações. Os controles automáticos durante a produção proporcionam um produto uniforme de alta qualidade. Os arames tubulares com fluxo não metálico (flux-cored wires) são especificamente desenvolvidos para soldar aços doces usando como gás de proteção o dióxido de carbono (CO_2) ou misturas argônio - CO_2.

A soldagem empregando arames tubulares com fluxo não metálico (flux-cored wires) oferece muitas vantagens inerentes ao processo sobre a soldagem com eletrodos revestidos. Taxas de deposição mais altas (tipicamente o dobro) e ciclos de trabalho maiores (não há troca de eletrodos) significam economia no custo da mão de obra. A penetração mais profunda alcançada com os arames tubulares permite também menos preparação de juntas, e ainda proporciona soldas com qualidade, livres de falta de fusão e aprisionamento de escória.

Capítulo 2

EQUIPAMENTOS

Soldagem manual

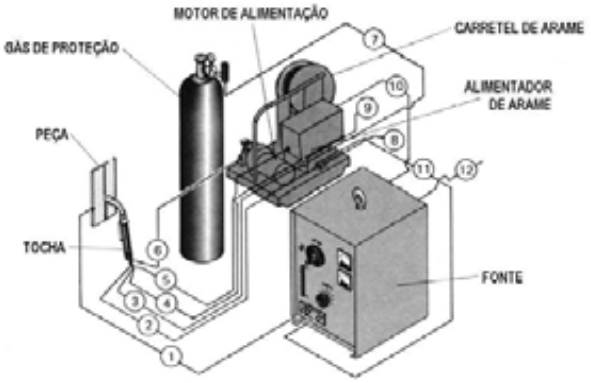
Os equipamentos de soldagem MIG/MAG podem ser usados manual ou automaticamente. Veja na Figura 6 o modelo de um equipamento para a soldagem manual.

Equipamentos para soldagem manual são fáceis de instalar. Como o trajeto do arco é realizado pelo soldador, somente três elementos principais são necessários:

- tocha de soldagem e acessórios;
- motor de alimentação do arame;
- fonte de energia.

Tochas de soldagem e acessórios

A tocha guia o arame e o gás de proteção para a região de soldagem. Ela também leva a energia de soldagem até o arame. Tipos diferentes de tocha foram desenvolvidos para proporcionar o desempenho máximo na soldagem para diferentes tipos de aplicações. Elas variam desde tochas para ciclos de trabalho pesados para atividades envolvendo altas correntes até tochas leves para baixas correntes e soldagem fora de posição. Em ambos os casos estão disponíveis tochas refrigeradas a água ou secas (refrigeradas pelo gás de proteção), e tochas com extremidades retas ou curvas. Geralmente são adicionados sistemas de refrigeração na tocha para facilitar o manuseio. Nos casos em que são executados trabalhos com altas correntes é possível usar uma tocha mais robusta.



1. CABO DE SOLDA (NEGATIVO)
2. REFRIGERAÇÃO DA TOCHA (ÁGUA)
3. GÁS DE PROTEÇÃO
4. GATILHO DA TOCHA
5. ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO PARA A TOCHA
6. CONDUÍTE DO ARAME
7. GÁS DE PROTEÇÃO VINDO DO CILINDRO
8. SAÍDA DE ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO
9. ENTRADA DE ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO
10. ENTRADA DE 42 V (CA)
11. CABO DE SOLDA (POSITIVO)
12. CONEXÃO PARA A FONTE PRIMÁRIA (220/380/440 V)

Figura 6 - Instalações para a soldagem manual

A Figura 7 mostra as partes de uma tocha seca típica (tocha convencional ou refrigerada pelo gás de proteção) com extremidade curva, contendo os seguintes acessórios:

- bico de contato;
- bocal;
- conduíte;
- cabo.

A Figura 7 mostra as partes de uma tocha seca típica (tocha convencional ou refrigerada pelo gás de proteção) com extremidade curva, contendo os seguintes acessórios:

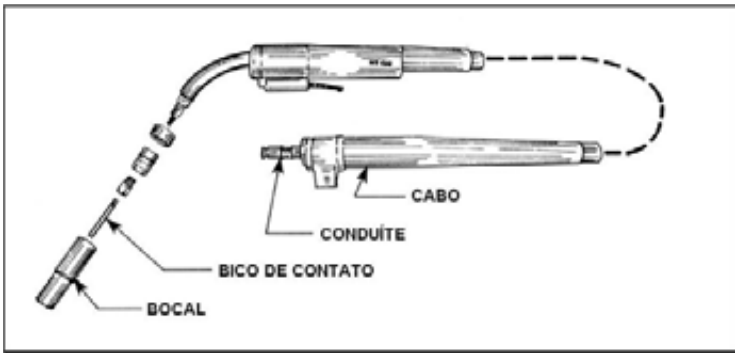


Figura 7 - Tocha MIG/MAG típica

O bico de contato é fabricado de cobre e é utilizado para conduzir a energia de soldagem até o arame bem como dirigir o arame até a peça. A tocha (e também o bico de contato) é conectada à fonte de soldagem pelo cabo de solda. Como o arame deve ser alimentado facilmente pelo bico de contato e também fazer um bom contato elétrico, seu diâmetro interno é importante. O folheto de instruções fornecido com cada tocha relaciona o diâmetro correto do bico de contato para cada diâmetro de arame. O bico de contato, que é uma peça de reposição, deve ser preso firmemente à tocha e centrado no bocal.

O bocal direciona um fluxo de gás até a região de soldagem. Bocais grandes são usados na soldagem a altas correntes onde a poça de fusão é larga. Bocais menores são empregados na soldagem a baixas correntes.

O conduíte é conectado entre a tocha e as roldanas de alimentação. Ele direciona o arame à tocha e ao bico de contato. É necessária uma alimentação uniforme para se obter a estabilidade do arco. Quando não suportado adequadamente pelo conduíte, o arame pode se enroscar. Quando se usam arames de aço, recomenda-se que a espiral do conduíte seja de aço. Outros materiais como nylon e outros plásticos devem ser empregados para arames de alumínio. A literatura fornecida com cada tocha lista os conduítes recomendados para cada diâmetro e material do arame.

Alimentador de arame

O motor de alimentação de arame e o controle de soldagem são freqUentemente fornecidos em um único módulo — o alimentador de arame — mostrado na Figura 6. Sua principal função é puxar o arame do carretel e alimentá-lo ao arco. O controle mantém a velocidade predeterminada do arame a um valor adequado à aplicação. O controle não apenas mantém a velocidade de ajuste independente do peso, mas também regula o início e fim da alimentação do arame a partir do sinal enviado pelo gatilho da tocha.

O gás de proteção, a água e a fonte de soldagem são normalmente enviados à tocha pela caixa de controle. Pelo uso de válvulas solenóides os fluxos de gás e de água são coordenados com o fluxo da corrente de soldagem. O controle determina a seqüência de fluxo de gás e energização do contator da fonte. Ele também permite o pré e pós-fluxo de gás.

Fonte de soldagem

Quase todas as soldas com o processo MIG/MAG são executadas com polaridade reversa (CC+). O pólo positivo é conectado à tocha, enquanto o negativo é conectado à peça. Já que a velocidade de alimentação do arame e, portanto, a corrente, é regulada pelo controle de soldagem, o ajuste básico feito pela fonte de soldagem é no comprimento do arco, que é ajustado pela tensão de soldagem. A fonte de soldagem também pode ter um ou dois ajustes adicionais para uso com outras aplicações de soldagem (por exemplo, indutância).

Quase todas as soldas com o processo MIG/MAG são executadas com polaridade reversa (CC+). O pólo positivo é conectado à tocha, enquanto o negativo é conectado à peça. Já que a velocidade de alimentação do arame e, portanto, a corrente, é regulada pelo controle de soldagem, o ajuste básico feito pela fonte de soldagem é no comprimento do arco, que é ajustado pela tensão de soldagem. A fonte de soldagem também pode ter um ou dois ajustes adicionais para uso com outras aplicações de soldagem (por exemplo, indutância).

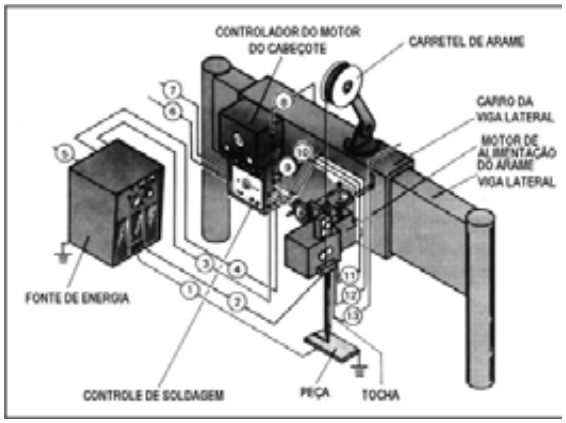
Soldagem automática

Equipamentos automáticos são utilizados quando a peça pode ser facilmente transportada até o local de soldagem ou onde muitas atividades repetitivas de soldagem justifiquem dispositivos especiais de fixação. O caminho do arco é automático e controlado pela velocidade de deslocamento do dispositivo. Normalmente a qualidade da solda é melhor e a velocidade de soldagem é maior.

Como pode ser observado na Figura 8, o equipamento de soldagem em uma configuração automática é o mesmo que numa manual, exceto:

- a tocha é normalmente montada diretamente sob o motor de alimentação do arame, eliminando a necessidade de um conduíte;
- dependendo da aplicação, essa configuração pode mudar;
- o controle de soldagem é montado longe do motor de alimentação do arame. Podem ser empregadas caixas de controle remoto;
- adicionalmente, outros dispositivos são utilizados para proporcionar o deslocamento automático do cabeçote. Exemplos desses dispositivos são os pórticos e os dispositivos de fixação.

O controle de soldagem também coordena o deslocamento do conjunto no início e no fim da soldagem.



1. CABO DE SOLDA (NEGATIVO)
2. CABO DE SOLDA (POSITIVO)
3. DETECÇÃO DE CORRENTE E TENSÃO DE SOLDAGEM
4. ENTRADA DE 42 V (CA)
5. CONEXÃO PARA A FONTE PRIMÁRIA (220/380/440 V)
6. ENTRADA DE ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO
7. ENTRADA DO GÁS DE PROTEÇÃO
8. SAÍDA PARA O MOTOR DE DESLOCAMENTO DO PÓRTICO
9. ENTRADA 42 V (CA) PARA A MOVIMENTAÇÃO / PARADA DO CABEÇOTE
10. MOTOR DE ALIMENTAÇÃO DO ARAME
11. ENTRADA DO GÁS DE PROTEÇÃO
12. ENTRADA DE ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO
13. SAÍDA DE ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO

Figura 8 - Instalações para a soldagem automática (mecanizada)

Capítulo 3

SUPRIMENTO DE ENERGIA

A fonte de energia

Fontes de corrente contínua e de tensão constante são empregadas na maioria dos casos de soldagem MIG/MAG. Essa característica contrasta com as fontes de corrente constante utilizadas na soldagem TIG e com eletrodos revestidos. Uma fonte MIG/MAG proporciona uma tensão do arco relativamente constante durante a soldagem. Essa tensão determina o comprimento do arco. Quando ocorre uma variação brusca da velocidade de alimentação do arame, ou uma mudança momentânea da tensão do arco, a fonte aumenta ou diminui abruptamente a corrente (e, portanto, a taxa de fusão do arame) dependendo da mudança no comprimento do arco. A taxa de fusão do arame muda automaticamente para restaurar o comprimento original do arco. Como resultado, alterações permanentes no comprimento do arco são efetuadas ajustando-se a tensão de saída da fonte. A velocidade de alimentação do arame que o operador seleciona antes da soldagem determina a corrente de soldagem (veja a Figura 9). Esse parâmetro pode ser alterado sobre uma faixa considerável antes que o comprimento do arco mude o suficiente para fazer o arame tocar na peça ou queimar o bico de contato.

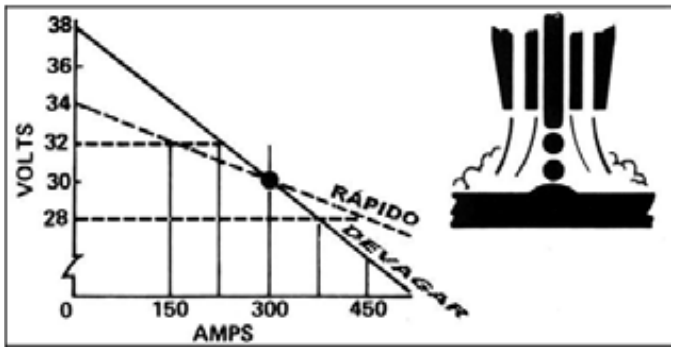


Figura 9 - Influência da velocidade de alimentação do arame

Variáveis da fonte

A característica de autocorreção do comprimento do arco do sistema de soldagem por tensão constante é muito importante na produção de condições estáveis de soldagem. Características elétricas específicas — a tensão do arco, a inclinação da curva tensão-corrente da fonte e a indutância, dentre outras — são necessárias para controlar o calor do arco, os respingos, etc.

Tensão do arco

A tensão do arco é a tensão entre a extremidade do arame e a peça. Devido às quedas de tensão encontradas no sistema de soldagem a tensão do arco não pode ser lida diretamente do voltímetro da fonte.

A tensão de soldagem (comprimento do arco) tem um importante efeito no modo de transferência de metal desejado. A soldagem por curto-circuito requer tensões relativamente baixas, enquanto a soldagem em aerossol necessita de tensões maiores. Deve ser observado também que, quando a corrente de soldagem e a taxa de fusão do arame são aumentadas, a tensão de soldagem também deve ser aumentada um tanto para manter a estabilidade. A Figura 10 mostra uma relação entre a tensão do arco e a corrente de soldagem para os gases de proteção mais comuns empregados na soldagem MIG/MAG de aços carbono. A tensão do arco é aumentada com o aumento da corrente de soldagem para proporcionar a melhor operação.

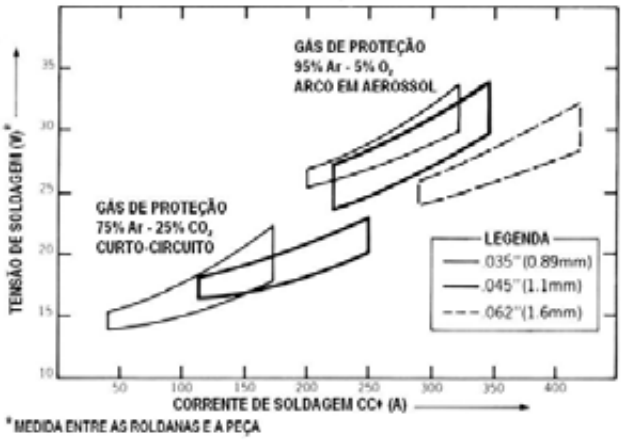


Figura 10 - Relação entre a tensão do arco e a corrente de soldagem

Inclinação da curva

A Figura 11 ilustra as características tensão-corrente de uma fonte MIG/MAG. O ângulo da curva com a horizontal é definido como a **inclinação** da curva da fonte. Esse parâmetro refere-se à redução na tensão de saída com o aumento da corrente. Então, uma fonte teoricamente de tensão

constante na realidade não proporciona **tensão constante**, havendo uma queda na tensão de circuito aberto com o aumento da corrente.

A inclinação da curva de uma fonte, como especificada pelo fabricante e medida nos terminais de saída, não representa a inclinação total do sistema. Qualquer componente que acrescente resistência ao sistema de soldagem aumenta a inclinação da curva e a queda de tensão para uma dada corrente de soldagem. Cabos, conexões, terminais, contatos sujos, etc., todos fazem aumentar a inclinação da curva. Por isso, em um sistema de soldagem, a inclinação da curva deve ser medida no arco.

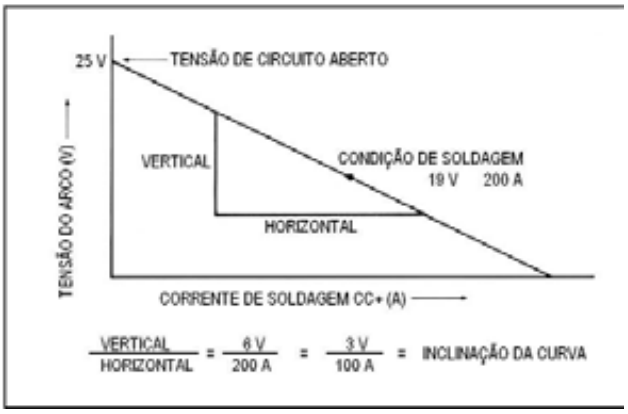

25 V
TENSÃO DE CIRCUITO ABERTO
TENSÃO DO ARCO (V)
VERTICAL
CONDIÇÃO DE SOLDAGEM
19 V 200 A
HORIZONTAL
CORRENTE DE SOLDAGEM CC+ (A)
VERTICAL / HORIZONTAL = 6 V / 200 A = 3 V / 100 A = INCLINAÇÃO DA CURVA

Figura 11 - Cálculo da inclinação da curva de um sistema de soldagem

A inclinação da curva em um sistema MIG/MAG é usada durante a soldagem por curto-circuito para limitar a corrente de curto-circuito de tal modo a reduzir a quantidade de respingos quando os curtos-circuitos entre o arame e a peça forem interrompidos. Quanto maior for a inclinação da curva, menores serão as correntes de curto-circuito e, dentro dos limites, menor será a quantidade de respingos.

O valor da corrente de curto-circuito deve ser alto o suficiente (mas não tão alto) para fundir o arame. Quando a inclinação é quase nula no circuito de soldagem a corrente aumenta até um valor muito alto, causando uma reação violenta, mas restrita. **Isso causa respingos**.

Quando uma corrente de curto-circuito for limitada a valores excessivamente baixos por causa de uma inclinação muito alta, o arame pode conduzir toda a corrente, e o curto-circuito não se interromperá por si só. Nesse caso o arame pode apinhar-se na peça ou ocasionalmente topar na poça de fusão e romper-se. Esses fenômenos são mostrados esquematicamente na Figura 12.

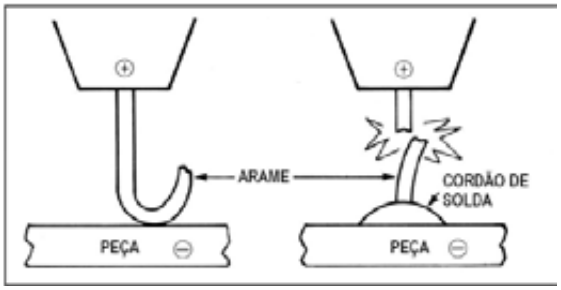


Figura 12 - Efeito de uma inclinação muito grande na curva característica

Quando a corrente de curto-circuito estiver no valor correto a separação da gota fundida do arame é suave, com muito poucos respingos. As correntes de curto-circuito típicas requeridas para a transferência de metal e a melhor estabilidade do arco podem ser observadas na Tabela III.

Tipo de arame	Diâmetro do Arame		Corrente de curto-circuito (A)
	pol (")	mm	
Aço Carbono	0,030	0,76	300
	0,035	0,89	320
	0,045	1,10	370
	0,052	1,30	395
	0,062	1,60	430
Alumínio	0,030	0,76	175
	0,035	0,89	195
	0,045	1,10	225
	0,062	1,60	290

Tabela III - Correntes típicas de curto-circuito requeridas para a transferência de metal

Indutância

As fontes não respondem instantaneamente às mudanças de carga. A corrente leva um tempo finito para atingir um novo valor. A indutância no circuito é a responsável por esse atraso. O efeito da indutância pode ser entendido analisando-se a curva mostrada na Figura 13. A curva A mostra uma curva típica de corrente-tempo com indutância presente quando a corrente aumenta de zero até o valor final. A curva B mostra o caminho que a corrente percorreria se não houvesse indutância no circuito. A corrente máxima alcançada durante um curto é determinada pela inclinação da curva característica da fonte. A indutância controla a taxa de aumento da corrente de curto-circuito. A taxa pode ser reduzida de maneira que o curto possa ser interrompido com um mínimo de respingos. A indutância também armazena energia. Ela fornece ao arco essa energia armazenada depois que o curto é interrompido, e causa um arco mais longo.

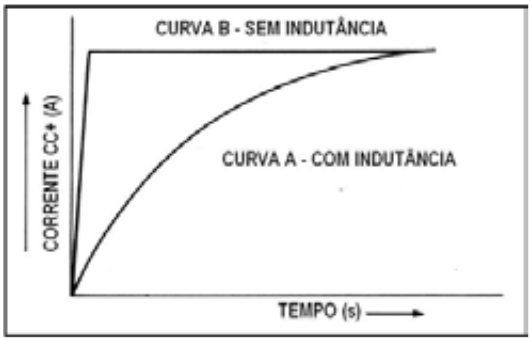


Figura 13 - Mudança no aumento da corrente devido à indutância

Na soldagem por curto-circuito um aumento na indutância aumenta o tempo de arco "ativo". Isso, por sua vez, torna a poça de fusão mais fluida, resultando em um cordão de solda mais achatado. A diminuição da indutância causa o efeito contrário. A Figura 14 mostra a influência da indutância no aspecto de cordões de solda feitos por meio da soldagem por curto-circuito com misturas argônio-oxigênio e hélio-argônio-dióxido de carbono. O cordão de solda no 1, confeccionado com uma mistura 98% Ar / 2% O_2 e sem indutância, apresenta uma crista, como pode ser observado na seção reta. No meio do cordão de solda foi imposta uma indutância de 500 mH. A crista não ficou tão proeminente, e o cordão de solda permaneceu convexo.

O cordão de solda nº 2, confeccionado com uma mistura de He-Ar-CO_2, também se apresenta convexo. A quantidade de respingos na chapa é considerável. Quando a indutância foi introduzida no meio da amostra, a redução da quantidade de respingos foi notável; o cordão tornou-se achatado e a seção reta abaixo à direita mostra que a penetração na peça aumentou.

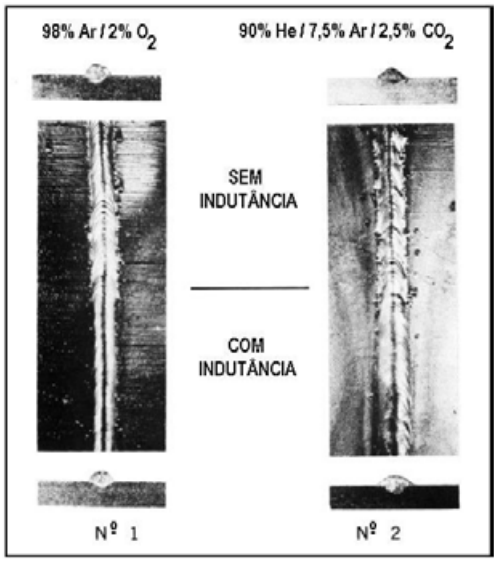


Figura 14 - Efeito da indutância no aspecto do cordão de solda

Na soldagem em aerossol a adição de indutância na fonte produzirá uma melhor partida de arco. Indutância excessiva resultará numa partida errática.

Quando for alcançada a condição de uma corrente de curto-circuito correta e uma taxa de aumento de corrente também correta, a quantidade de respingos será mínima. Os ajustes necessários na fonte para a condição de respingo mínimo variam com o material e diâmetro do arame. Como regra geral, o valor da corrente de curto-circuito e o valor da indutância necessária para a operação ideal aumentam à medida que o diâmetro do arame aumenta.

Capítulo 4

GASES DE PROTEÇÃO

O ar atmosférico é expulso da região de soldagem por um gás de proteção com o objetivo de evitar a contaminação da poça de fusão. A contaminação é causada principalmente pelo nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2) e vapor d'água (H_2O) presentes na atmosfera.

Como exemplo, o nitrogênio no aço solidificado reduz a ductilidade[1] e a tenacidade[2] da solda e pode causar fissuração. Em grandes quantidades o nitrogênio pode causar também porosidade.

O oxigênio em excesso no aço combina-se com o carbono e forma o monóxido de carbono (CO), que pode ser aprisionado no metal, causando porosidade. Além disso, o oxigênio em excesso pode se combinar com outros elementos no aço e formar compostos que produzem inclusões no metal de solda — o manganês (Mn) e o silício (Si), por exemplo.

Quando o hidrogênio (H), presente no vapor d'água e no óleo, combina-se com o ferro (Fe) ou com o alumínio (Al), resultará em porosidade e pode ocorrer fissuração sob cordão no metal de solda.

Para evitar esses problemas associados com a contaminação da poça de fusão, três gases principais são utilizados como proteção: argônio (Ar), hélio (He) e dióxido de carbono (CO_2). Além desses, pequenas quantidades de oxigênio (O_2), nitrogênio (N2) e hidrogênio (H2) provaram ser benéficas em algumas aplicações. Desses gases, apenas o argônio e o hélio são gases inertes[3]. A compensação para a tendência de oxidação dos outros gases é realizada pelas formulações especiais dos arames.

O argônio, o hélio e o dióxido de carbono podem ser empregados puros, em combinações ou misturados com outros gases para proporcionar soldas livres de defeitos numa variedade de aplicações e processos de soldagem.

1. Ductilidade é a capacidade de um material sofrer deformação plástica ou permanente sem se romper (carregamentos estáticos).
2. Tenacidade é a energia absorvida pelo material a uma determinada temperatura (carregamentos dinâmicos)
3. Gases inertes são aqueles que não se combinam com outros elementos.

Propriedades dos gases

As propriedades básicas dos gases de proteção que afetam o desempenho do processo de soldagem incluem:

- propriedades térmicas a temperaturas elevadas;
- reação química do gás com os vários elementos no metal de base e no arame de solda;
- efeito de cada gás no modo de transferência de metal.

A condutividade térmica do gás à temperatura do arco influencia a tensão do arco bem como a energia térmica transferida à solda. Quando a condutividade térmica aumenta, maior tensão de soldagem é necessária para sustentar o arco. Por exemplo, a condutividade térmica do hélio e do dióxido de carbono é muito maior que a do argônio; devido a isso, aqueles gases transferem mais calor à solda. Portanto, o hélio e o dióxido de carbono necessitam de uma tensão de soldagem maior para manter o arco estável.

A compatibilidade de cada gás com o arame e o metal de base determina a adequação das diversas combinações de gases. O dióxido de carbono e a maioria dos gases de proteção contendo oxigênio não devem ser utilizados na soldagem do alumínio, pois se formará o óxido de alumínio (Al_2O_3). Entretanto, o dióxido de carbono e o oxigênio são úteis às vezes e mesmo essenciais na soldagem MAG dos aços. Eles promovem estabilidade ao arco e uma boa fusão entre a poça de fusão e o material de base[4]. O oxigênio é bem mais reativo que o dióxido de carbono. Consequentemente, as adições de oxigênio ao argônio são geralmente menores que 12% em volume, enquanto o dióxido de carbono puro pode ser empregado na soldagem MAG de aços doces. Os arames de aço devem conter elementos fortemente desoxidantes para suprimir a porosidade quando usados com gases oxidantes, particularmente misturas com altos percentuais de dióxido de carbono ou oxigênio e especialmente o dióxido de carbono puro.

Os gases de proteção também determinam o modo de transferência do metal e a profundidade à qual a peça é fundida — a profundidade de penetração. A Tabela IV e a Tabela V sumarizam os gases de proteção recomendados para os vários materiais e tipos de transferência de metal. A transferência por aerossol não é obtida quando o gás de proteção é rico em CO_2. Por exemplo, misturas contendo mais que 20% CO_2 não exibem uma verdadeira transferência em aerossol. Até certo ponto, misturas até 30% CO_2 podem apresentar um arco com um aspecto semelhante ao aerossol a altos níveis de corrente, mas são incapazes de manter a estabilidade do arco obtida com misturas de menores teores de CO_2. Os níveis de respingos também tenderão a aumentar quando as misturas forem ricas em CO_2.

4. A boa fusão entre o metal de solda fundido e o metal de base é denominada molhabilidade. Argônio (Ar).

O argônio é um gás inerte que é usado tanto puro quanto em combinações com outros gases para alcançar as características de arco desejadas na soldagem de metais ferrosos e não ferrosos. Quase todos os processos de soldagem podem utilizar o argônio ou misturas de argônio para alcançar boa soldabilidade, propriedades mecânicas, características do arco e produtividade. O argônio é empregado puro em materiais não ferrosos como o alumínio, ligas de níquel, ligas de cobre e materiais reativos que incluem o zircônio, titânio e tântalo. O argônio proporciona excelente estabilidade ao arco no modo de transferência por aerossol, boa penetração e ótimo perfil do cordão na soldagem desses metais. Algumas soldas em curto-circuito de materiais de pequena espessura são também viáveis. Quando usado na soldagem de metais ferrosos, o argônio é normalmente misturado com outros gases como o oxigênio, hélio, hidrogênio, dióxido de carbono e/ou nitrogênio.

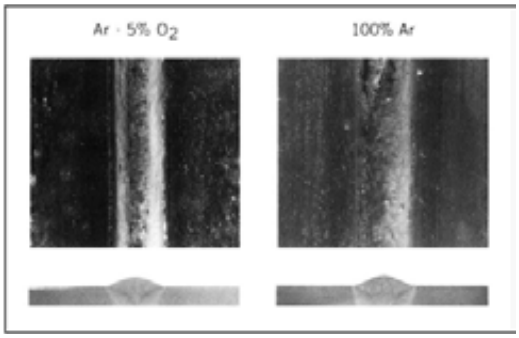


Figura 15 - Efeito de adições de oxigênio ao argônio

O baixo potencial de ionização do argônio cria uma excelente condução da corrente e uma estabilidade de arco superior. O argônio produz uma coluna de arco restrita a uma alta densidade de corrente que faz com que a energia do arco fique concentrada em uma pequena área. O resultado é um perfil de penetração profunda possuindo a forma de um dedo — perfil dediforme — (veja a Figura 17).

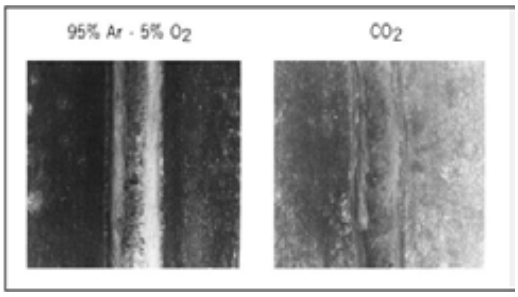


Figura 16 - Comparação entre os gases de proteção 95% Ar/5% O_2 e CO_2

Figura 17 - Perfil *dediforme* obtido na soldagem MAG empregando arame sólido cobreado e uma mistura Ar/CO_2

Dióxido de carbono (CO_2)

O dióxido de carbono puro não é um gás inerte porque o calor do arco o dissocia em monóxido de carbono e oxigênio livre (veja a Equação [1]). Esse oxigênio combinar-se-á com os elementos em transferência através do arco para formar óxidos que são liberados da poça de fusão na forma de escória ou carepa. Embora o CO_2 seja um gás ativo e produza um efeito oxidante, soldas íntegras podem ser consistente e facilmente obtidas sem a presença de porosidade e outras descontinuidades.

[1] $2CO_2 \rightarrow 2CO + O_2$

O dióxido de carbono é largamente empregado na soldagem de aços. Sua popularidade é devida a sua disponibilidade e à boa qualidade da solda, bem como pelo seu baixo custo e

instalações simples. Deve ser mencionado que o baixo custo do gás não necessariamente se traduz num baixo custo por metro linear de solda, sendo fortemente dependente da aplicação. A baixa eficiência de deposição que o CO_2 proporciona — causada pela perda por respingos — influencia no custo final da solda.

O dióxido de carbono não permitirá uma transferência em aerossol; por isso, os modos de transferência de metal ficam restritos ao curto-circuito e à transferência globular. A vantagem do CO_2 são velocidades de soldagem maiores e penetração profunda. Os maiores inconvenientes do CO_2 são a indesejável transferência globular e, consequentemente, os altos níveis de respingos na solda. A superfície do cordão de solda resultante da proteção com o CO_2 puro é, na maioria dos casos, fortemente oxidada. Um arame de solda contendo grande quantidade de elementos desoxidantes é algumas vezes necessário para compensar a natureza reativa do gás. De um modo geral, boas propriedades mecânicas podem ser obtidas com o CO_2. O argônio é misturado frequentemente com o CO_2 para balancear as características de desempenho do CO_2 puro. Se as propriedades de impacto tiverem que ser maximizadas, são recomendadas misturas de Ar e CO_2.

Hélio (He)

O hélio é um gás inerte que é empregado nas aplicações de soldagem onde são necessários um maior aporte térmico para melhorar a molhabilidade do cordão de solda, maior penetração e maior velocidade de soldagem. Na soldagem MIG o hélio não produz um arco tão estável quanto o argônio. Comparado com o argônio, o hélio apresenta maior condutividade térmica e maior variação de tensão, e conduz a um perfil de penetração mais largo e mais raso. A soldagem MIG do alumínio com hélio puro não proporciona a mesma ação de limpeza que o argônio puro, porém é benéfico e algumas vezes recomendado para a soldagem de peças espessas de alumínio. O arco elétrico com o hélio é mais largo que com o argônio, o que reduz a densidade de corrente. A maior variação de tensão provoca maiores aportes térmicos em relação ao argônio, promovendo então maior fluidez da poça de fusão e subsequente maior molhabilidade do cordão de solda. Esse fenômeno é vantajoso na soldagem do alumínio, magnésio e ligas de cobre.

O hélio é frequentemente misturado em diversas proporções com o argônio para tirar vantagem das boas características de ambos os gases. O argônio melhora a estabilidade do arco e a ação de limpeza, na soldagem do alumínio e do magnésio, enquanto o hélio melhora a molhabilidade e a coalescência do metal de solda.

Misturas binárias

Argônio-oxigênio

A adição de pequenas quantidades de O_2 ao argônio estabiliza muito bem o arco elétrico, aumenta a taxa de fusão do arame, abaixa a corrente de transição para transferência em aerossol, e melhora a molhabilidade e o perfil do cordão de solda. A poça de fusão fica mais fluida e permanece no estado líquido por mais tempo, permitindo que o metal flua até os cantos do chanfro. Isso reduz as mordeduras e ajuda a manter achatado o cordão de solda. Ocasionalmente, pequenas adições de oxigênio são utilizadas em aplicações de metais não ferrosos. Por exemplo, pode ser encontrado na literatura que a adição de 0,1% de oxigênio é útil para a estabilização do arco na soldagem de chapas de alumínio superpuro.

Argônio / 1% O_2 – essa mistura é primariamente empregada na transferência em aerossol para aços inoxidáveis. 1% O2 é normalmente suficiente para estabilizar o arco, aumentar a taxa de gotejamento, proporcionar coalescência e melhorar a aparência do cordão de solda.

Argônio / 2% O_2 – essa mistura é utilizada na soldagem MIG com transferência em aerossol de aços carbono, aços de baixa liga e aços inoxidáveis. Ela proporciona uma ação extra de molhabilidade sobre a mistura a 1% O_2. As propriedades mecânicas e a resistência à corrosão das soldas feitas com adições de 1% O_2 e 2% O_2 são equivalentes.

Argônio / 5% O_2 – essa mistura proporciona uma poça de fusão mais fluida, porém controlável. É a mistura argônio-oxigênio mais comum empregada na soldagem em geral dos aços carbono. O oxigênio adicional também permite maiores velocidades de soldagem.

Argônio / 8-12% O_2 – a principal aplicação dessa mistura é na soldagem monopasse. O potencial de oxidação mais alto desses gases deve ser levado em consideração com respeito à composição química do arame de solda. Em alguns casos será necessário o uso de um arame com maior teor de elementos de liga para compensar a natureza reativa desse gás de proteção. A maior fluidez da poça de fusão e a menor corrente de transição para transferência em aerossol dessas misturas pode apresentar algumas vantagens em diversas aplicações de soldagem.

Argônio / 12-25% O_2 – misturas com níveis muito altos de oxigênio têm sido empregadas limitadamente, porém os benefícios do uso de 25% O_2 contra 12% O_2 são discutíveis. A fluidez excessiva da poça de fusão é uma característica desse gás. É de se esperar sobre a superfície do cordão de solda uma camada espessa de escória e/ou carepa de difícil remoção. Soldas íntegras podem ser confeccionadas a 25% O2 com pouca ou nenhuma porosidade. É recomendada a remoção da escória / carepa antes dos passes de solda subsequentes para assegurar a melhor integridade da solda.

Argônio-dióxido de carbono (Ar / CO_2)

As misturas argônio-dióxido de carbono são usadas principalmente nos aços carbono e de baixa liga e, com aplicação limitada, em aços inoxidáveis. As adições de argônio ao dióxido de carbono diminuem os níveis de respingo normalmente experimentados com o dióxido de carbono puro. Pequenas adições de dióxido de carbono ao argônio produzem as mesmas características de transferência em aerossol que as pequenas adições de oxigênio. A diferença recai na maioria das vezes nas maiores correntes de transição para transferência em aerossol das misturas argônio / dióxido de carbono. Na soldagem MIG/MAG com adições de dióxido de carbono um nível de corrente ligeiramente maior deve ser atingido para estabelecer e manter uma transferência de metal estável em aerossol através do arco. Adições de oxigênio reduzem a corrente de transição para transferência em aerossol. Acima de aproximadamente 20% CO_2 a transferência em aerossol torna-se instável e começam a ocorrer aleatoriamente transferências por curto-circuito e globular.

Argônio / 3-10% CO_2 – essas misturas são empregadas na transferência por curto-circuito e na transferência em aerossol em uma série de espessuras de aços carbono. Como as misturas conseguem utilizar os dois modos de transferência com sucesso esse gás ganhou muita popularidade como uma mistura versátil. Misturas a 5% são muito comuns na soldagem MIG pulsada fora de posição de peças espessas de aços de baixa liga. As soldas são geralmente menos oxidadas que aquelas com misturas 98% Ar / 2% CO_2. Melhores penetrações são alcançadas com menos porosidade quando se utilizam adições de dióxido de carbono no lugar das adições de oxigênio. Considerando a molhabilidade, é necessário o dobro de dióxido de carbono na mistura para se conseguir o mesmo resultado que com o oxigênio. De 5% a 10% CO_2 o arco torna-se muito forte e definido, dando a essas misturas mais tolerância à carepa e uma poça de fusão muito fácil de controlar.

Argônio / 11-20% CO_2 – essa faixa de misturas tem sido empregada em diversas aplicações de soldagem MIG/MAG como chanfro estreito, soldagem fora de posição de chapas finas e soldagem a altas velocidades. A maioria das aplicações é em aços carbono e de baixa liga. Misturando o dióxido de carbono nessa faixa, pode ser alcançada a produtividade máxima na soldagem de peças de pequena espessura. Isso é feito minimizando a possibilidade de furar a peça e simultaneamente maximizando as taxas de deposição e as velocidades de soldagem. Menores teores de dióxido de carbono também melhoram a eficiência de deposição por meio da redução das perdas por respingos.

Argônio / 21-25% CO_2 (C25) – essa faixa é universalmente conhecida como o gás usado na soldagem MAG com transferência por curto-circuito em aços doces. Foi originalmente formulado

para maximizar a frequência de curto-circuito em arames sólidos de diâmetros 0,8 mm e 0,9 mm, mas, ao longo dos anos, tornou-se o padrão de fato para a maioria dos diâmetros dos arames sólidos e também dos arames tubulares mais comuns.

Essa mistura funciona bem em aplicações de altas correntes em materiais espessos, e pode alcançar boa estabilidade do arco, controle da poça de fusão e aparência do cordão, bem como alta produtividade (veja a Figura 18).

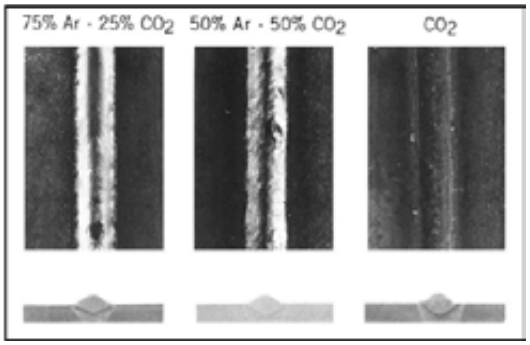


Figura 18 - Efeito de adições de dióxido de carbono (CO_2) ao argônio (Ar)

Argônio / 50% CO_2 – essa mistura é utilizada quando são necessários um alto aporte térmico e uma penetração profunda. As espessuras das peças devem ser acima de 3,2 mm e as soldas podem ser executadas fora de posição. Essa mistura é muito popular para a soldagem de dutos empregando a transferência por curto-circuito. Boa molhabilidade e bom perfil do cordão sem fluidez excessiva da poça de fusão são as principais vantagens na soldagem de dutos. A soldagem de peças finas apresenta maior tendência a furar, o que limita a versatilidade em geral desse gás. Durante a soldagem a altos níveis de corrente, a transferência de metal é mais parecida com a da soldagem com dióxido de carbono puro que as misturas anteriores, mas alguma redução nas perdas por respingos pode ser obtida graças à adição de argônio (veja a Figura 18)

Argônio / 75% CO_2 – essa mistura é algumas vezes empregada em tubulações de paredes grossas, e é a melhor em termos de fusão lateral das paredes do chanfro e em profundidade de penetração. O argônio auxilia na estabilização do arco e na redução de respingos.

Argônio-hélio

Misturas argônio-hélio são utilizadas em vários materiais não-ferrosos como o alumínio, cobre, ligas de níquel e metais reativos. Esses gases usados em diversas combinações aumentam a tensão e o calor do arco na soldagem MIG e na TIG enquanto mantém as características favoráveis do argônio. Geralmente, quanto mais pesado o material, maior o percentual de hélio. Pequenos percentuais de hélio, abaixo de 10%, afetarão as características do arco e as propriedades mecânicas da solda. Quando o percentual do hélio aumenta, aumentam também a tensão do arco, a quantidade de respingos e a penetração, e minimiza a porosidade. O gás hélio puro aumenta a penetração lateral e a largura do cordão de solda, mas a profundidade de penetração pode ficar prejudicada. Por outro lado, a estabilidade do arco também aumenta. O teor de argônio deve ser de pelo menos 20% quando misturado com o hélio para gerar e manter um arco estável em aerossol (veja a Figura 19).

Argônio / 25% He (HE-25) – essa mistura pouco usada é algumas vezes recomendada para a soldagem de alumínio, onde é procurado um aumento na penetração, sendo a aparência do cordão da maior importância.

Argônio / 75% He (HE-75) – essa mistura comumente utilizada é largamente empregada na soldagem automática de alumínio com espessura maior que 25 mm na posição plana. A mistura HE-25 também aumenta o aporte térmico e reduz a porosidade das soldas de cobre com espessura entre 6,5 mm e 12,5 mm.

Argônio / 90% He (HE-90) – essa mistura é usada na soldagem do cobre com espessura acima de 12,5 mm e do alumínio com espessura acima de 75 mm. Apresenta um aporte térmico alto que melhora a coalescência da solda e proporciona boa qualidade radiográfica. É também empregada na transferência por curto-circuito com metais de adição com alto teor de níquel.

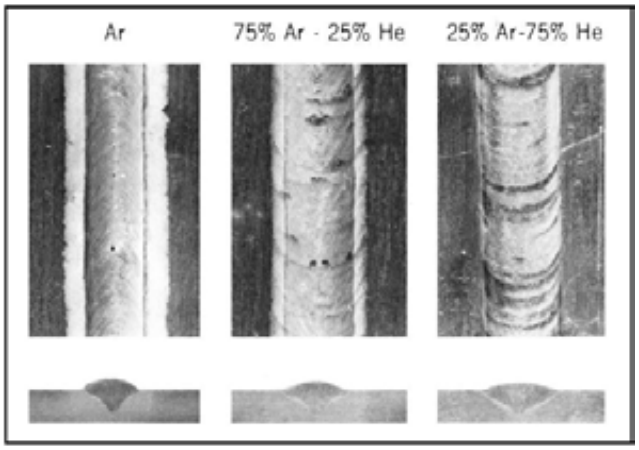


Figura 19 - Efeito de adições de hélio ao argônio

Argônio-nitrogênio (N_2)

Pequenas quantidades de nitrogênio têm sido adicionadas a misturas Ar / 1% O_2 para se obter uma microestrutura completamente austenítica em soldas feitas com metais de adição inoxidáveis do tipo 347. Concentrações de nitrogênio na faixa de 1,5% a 3% têm sido utilizadas. Quantidades acima de 10% produziam muitos fumos, mas as soldas eram íntegras. Adições maiores que 2% N_2 produziam porosidade em soldas MIG monopasse realizadas em aços doces; por outro lado, adições menores que 0,5% de nitrogênio causavam porosidade em soldas multipasses em aços carbono. Poucas tentativas foram feitas para empregar misturas de argônio ricas em nitrogênio na soldagem MIG do cobre e suas ligas, mas o índice de respingos é alto.

Argônio / cloro (Cl_2)

O cloro é às vezes borbulhado através do alumínio fundido para remover o hidrogênio de lingotes ou de fundidos. Como essa atividade de desgaseificação é bem sucedida, infere-se que o cloro poderia remover o hidrogênio do metal de solda. No entanto, existem reivindicações de que misturas Ar / Cl_2 eliminaram a porosidade na soldagem MIG, porém os fabricantes de componentes não obtiveram resultados consistentes. Além disso, como o gás cloro (Cl_2) forma ácido clorídrico no sistema respiratório humano, tais misturas podem ser desagradáveis ou nocivos aos operadores e ao pessoal que trabalha próximo à área de soldagem. Consequentemente, misturas Ar / Cl_2 não são populares nem recomendadas, exceto em casos especiais onde sejam implementados controle e segurança adequados.

Misturas ternárias

Argônio-oxigênio-dióxido de carbono

Misturas contendo esses três componentes são denominadas misturas universais devido a sua capacidade de operar com os modos de transferência por curto-circuito, globular, em aerossol e pulsado. Diversas misturas ternárias estão disponíveis, e sua aplicação dependerá do mecanismo de transferência desejado e da otimização das características do arco.

Argônio / 5-10% CO2 / 1-3% O_2 – a principal vantagem dessa mistura ternária é sua versatilidade na soldagem de aços carbono, de baixa liga e inoxidáveis de todas as espessuras empregando qualquer modo de transferência aplicável. A soldagem de aços inoxidáveis deve ser limitada apenas ao arco em aerossol devido à pouca fluidez da poça de fusão sob baixas correntes. A

captura de carbono em aços inoxidáveis também deve ser considerada em alguns casos. Em aços carbono e de baixa liga essa mistura produz boas características de soldagem e de propriedades mecânicas. Em materiais de pequena espessura o oxigênio auxilia na estabilidade do arco sob correntes muito baixas (30 a 60 A), permitindo que o arco seja mantido curto e controlável. Isso contribui para minimizar a possibilidade de furar a peça e de haver distorções ao se reduzir o aporte térmico total na região de soldagem.

Argônio /10-20% CO2 / 5% O_2 – essa mistura produz uma transferência quente por curto-circuito e uma poça de fusão fluida. A transferência em aerossol é boa e parece gerar algum benefício na soldagem com arames três vezes desoxidados, já que uma poça de fusão que se solidifica lentamente é característica desses arames.

Argônio-dióxido de carbono-hidrogênio

Pequenas adições de hidrogênio (1-2%) melhoram a molhabilidade do cordão de solda e a estabilidade do arco quando se soldam aços inoxidáveis com soldagem MIG pulsada. O dióxido de carbono é mantido baixo também (1-3%) para minimizar a captura do carbono e manter uma boa estabilidade do arco. Essa mistura não é recomendada a aços de baixa liga porque poderiam se desenvolver níveis excessivos de hidrogênio no metal de solda e causar fissuração por hidrogênio e propriedades mecânicas ruins.

Argônio-hélio-dióxido de carbono

Adições de hélio e dióxido de carbono ao argônio aumentam o aporte térmico na região de solda e melhoram a estabilidade do arco. Consegue-se melhor molhabilidade e melhor perfil do cordão de solda. Durante a soldagem de aços carbono e de baixa liga, as adições de hélio servem para aumentar o aporte térmico e melhorar a fluidez da poça de fusão da mesma forma que é adicionado o oxigênio, exceto que o hélio é inerte, e então a oxidação do metal de solda e a perda de elementos de liga não chega a ser um problema. Durante a soldagem de um material de baixa liga as propriedades mecânicas podem ser alcançadas e mantidas com mais facilidade.

Argônio / 10-30% He / 5-15% CO_2 – as misturas nessa faixa foram desenvolvidas e colocadas no mercado para a soldagem pulsada em aerossol de aços carbono e de baixa liga. O melhor desempenho é em seções espessas e em aplicações fora de posição onde são almejadas taxas de deposição máximas. Boas propriedades mecânicas e controle da poça de fusão são características dessa mistura. A soldagem por arco pulsado em aerossol a baixas correntes é aceitável, mas em misturas com baixo teor de CO e/ou de O_2 melhorará a estabilidade do arco.

60-70% He / 20-35% Ar / 4-5% CO_2 – essa mistura é empregada na soldagem com transferência por curto-circuito de aços de alta resistência, especialmente em aplicações fora de posição. O teor de CO2 é mantido baixo para assegurar boa tenacidade ao metal de solda. O hélio proporciona o calor necessário para a fluidez da poça de fusão. Altos teores de hélio não são necessários, já que a poça de fusão pode se tornar excessivamente fluida e dificultar seu controle.

90% He / 7,5% Ar / 2,5% CO_2 – essa mistura é largamente utilizada na soldagem por curto-circuito de aços inoxidáveis em todas as posições. O teor de CO_2 é mantido baixo para minimizar a captura de carbono e garantir boa resistência à corrosão, especialmente em soldas multipasse. A adição de argônio e dióxido de carbono proporciona boa estabilidade ao arco e boa penetração. O alto teor de hélio proporciona aporte térmico para superar a quietude da poça de fusão dos aços inoxidáveis.

Argônio-hélio-oxigênio

A adição de hélio ao argônio aumenta a energia do arco durante a soldagem de materiais não ferrosos; sua adição a misturas argôniooxigênio tem o mesmo efeito na soldagem MIG de materiais ferrosos. As misturas Ar-He-O_2 têm sido usadas ocasionalmente na soldagem por arco em aerossol e em revestimentos de aços inoxidáveis e de baixa liga para melhorar a fluidez da poça de fusão e o perfil do cordão, e reduzir a porosidade.

Misturas quaternárias

Argônio-hélio-dióxido de carbono-oxigênio

Comumente conhecida como quad-mix, essa combinação é mais popular na soldagem MIG de alta deposição empregando uma característica de arco que permita um tipo de transferência de metal de alta densidade. Essa mistura resultará em boas propriedades mecânicas e funcionalidade por meio de uma larga faixa de taxas de deposição. Sua maior aplicação é a soldagem de materiais de base de alta resistência e baixa liga, porém tem sido usada na soldagem de alta produtividade de aços doces. Os custos da soldagem são uma importante consideração no uso desse gás para a soldagem de aços doces, visto que outras misturas de menor preço estão disponíveis para a soldagem de alta deposição.

Independentemente do tipo de soldagem que precisa ser executado, existe sempre um gás de proteção que melhor se adequará para soldar uma série de materiais empregando-se os modos de transferência por curto-circuito ou em aerossol (veja a Tabela IV e a Tabela V).

Metal	Ar	He	Ar-He	Ar-CO_2	Ar-He-CO_2	Ar-O_2-CO_2	CO_2
Alumínio	X	X	(25-75)				
Aços-Carbono				(75-25) (50-50) (92-8) (85-15)		(>90-<5-<10)	X(1)
Aços de alta Resistência					(2,5-96-1,5) ACIMA DE 14 MSG	(>90-<5-<10) ATÉ 14 MSG	
Cobre			(25-75)				
Aços Inoxidáveis				(75-25)(1)	(7,5-90-2,5)	(>90-<5-<10)	
Ligas de Niquel	X		(10-90) (25-75)		(7,5-90-2,5)		
Metais reativos	X	X	(25-75)				

(1) É necessário um arame desenvolvido para a soldagem com CO_2.

Tabela IV - Carta de seleção de gases de proteção para a soldagem MIG/MAG com transferência por curto-circuito

Metal	Ar	He	Ar-O_2	Ar-CO_2	Ar-He	Ar-He-CO_2	Ar-O_2-CO_2(2)	Ar-CO-H_2	CO_2 (3)
Alumínio	X	X			(10-90) (25-75)				
Aços-Carbono			(98-2) (95-5)	(85-15) (92-8) (75-25)(1) PULSADO 95-5			(>90-<5-<10) (95-2,5-7,5)		X
Aços de baixa liga			(98-2)	(92-8)		(2,5-96-1,5)	(>90-<5-<10) ACIMA DE 2,4 mm (95-2,5-7,5)		
Cobre e bronze ao silício	X	X			(10-90) (25-75)				
Aços Inoxidáveis			(99-1) (98-2)					H_2-1 CO_2-2	
Ligas de Niquel	X	X			(25-75)				
Metais reativos	X	X							

(1) Soldas monopasse
(2) Alta qualidade em chapas com carepa de usina quando são usados os arames L-TEC 83 e 87 HP
(3) Usado com arame tubular e para a soldagem de alta velocidade com arame sólido
(4) Materiais de pequena espessura

Tabela V - Carta de seleção de gases de proteção para a soldagem MIG/MAG com transferência por aerossol e aerossol pulsado

Capítulo 5

ARAMES

Um dos mais importantes fatores a considerar na soldagem MIG é a seleção correta do arame de solda. Esse arame, em combinação com o gás de proteção, produzirá o depósito químico que determina as propriedades físicas e mecânicas da solda. Basicamente existem cinco fatores principais que influenciam a escolha do arame para a soldagem MIG/MAG:

- a composição química do metal de base;
- as propriedades mecânicas do metal de base;
- o gás de proteção empregado;
- o tipo de serviço ou os requisitos da especificação aplicável;
- o tipo de projeto de junta.

Entretanto, a grande experiência na soldagem industrial levou a *American Welding Society — AWS —* a simplificar a seleção. Foram desenvolvidos e fabricados arames que produzem os melhores resultados com materiais de base específicos. Embora não exista uma especificação aplicável à indústria em geral, a maioria dos arames está em conformidade com os padrões da AWS.

Materiais ferrosos

Antes de abordar os arames específicos para a soldagem MIG/MAG de materiais ferrosos, existem similaridades básicas que todo o arame ferroso compartilha nos elementos de liga adicionados ao ferro. Na soldagem MIG/MAG de aços carbono a função primária das adições de elementos de liga é controlar a desoxidação da poça de fusão e ajudar a determinar as propriedades mecânicas da solda. Desoxidação é a combinação de um elemento com o oxigênio da poça de fusão, resultando numa escória ou num filme vítreo sobre a superfície do cordão de solda. A remoção do oxigênio da poça de fusão elimina a principal causa de porosidade no metal de solda.

Silício (Si) – é o elemento mais comum empregado como desoxidante em arames usados na soldagem MIG/MAG. Geralmente os arames contêm de 0,40% a 1,00% de silício, dependendo da aplicação. Nessa faixa percentual o silício apresenta uma capacidade de desoxidação muito boa. Quantidades maiores de silício aumentarão a resistência mecânica da solda com pequena redução na ductilidade e na tenacidade. No entanto, acima de 1,0-1,2% de silício o metal de solda pode tornar-se sensível à fissuração.

Manganês (Mn) – é também comumente utilizado como desoxidante e para aumentar a resistência mecânica. O manganês está presente com 1,00% a 2,00% dos arames de aço doce. Teores maiores de manganês aumentam a resistência do metal de solda com uma influência maior que o silício. O manganês também reduz a sensibilidade à fissuração a quente do metal de solda.

Alumínio (Al), titânio (Ti) e zircônio (Zr) – esses elementos são desoxidantes poderosos. São feitas algumas vezes adições muito pequenas desses elementos, usualmente não mais que 0,20% como teor total dos três elementos. Nessa faixa é obtido algum aumento na resistência mecânica.

Carbono (C) – o carbono é o elemento que apresenta a maior influência nas propriedades mecânicas e microestruturais. Na fabricação de arames de aço para a soldagem MIG/MAG o teor de carbono dos arames é geralmente mantido de 0,05% a 0,12%. Essa faixa é suficiente para proporcionar a resistência necessária ao metal de solda sem afetar consideravelmente a ductilidade, a tenacidade e a porosidade. Maiores teores de carbono no arame e no metal de base têm o efeito de gerar porosidade, particularmente durante a soldagem com o gás de proteção CO2. Quando o teor de carbono do arame e/ou da peça ultrapassar 0,12% o metal de solda perderá carbono na forma de CO. Esse fenômeno pode causar porosidade, porém desoxidantes adicionais auxiliam a superá-lo.

Outros – níquel, cromo e molibdênio são frequentemente adicionados para melhorar as

propriedades mecânicas e/ou a resistência à corrosão. Em pequenas quantidades eles podem ser adicionados aos arames de aço carbono para melhorar a resistência e a tenacidade do depósito. São adicionados em maiores quantidades nos arames de aço inoxidável. Geralmente, quando a soldagem é realizada com argônio a 1-3% de oxigênio ou com misturas de argônio contendo baixos teores de dióxido de carbono, a composição química do metal de solda não diferirá muito da composição química do arame. No entanto, quando o dióxido de carbono é usado como gás de proteção, podem ser esperadas reduções nos teores de silício, manganês e outros elementos desoxidantes. Os teores de níquel, cromo, molibdênio e carbono permanecerão constantes. Arames com teor de carbono muito baixo (0,04-0,06%) produzirão, com o dióxido de carbono como gás de proteção, metais de solda com maior teor de carbono.

Arames de aço carbono

A Tabela VI lista os requisitos químicos e as designações para todos os arames de aço doce cobertos pela especificação AWS A5.18. A Tabela VII mostra os valores mínimos das propriedades mecânicas dos depósitos de solda na condição como soldados. Embora as propriedades mecânicas e os requisitos de serviço influenciem fortemente a seleção do arame em alguns casos, considerações mais genéricas poderão ser mais úteis na maioria das aplicações e dos projetos de junta. Quando a corrente de soldagem, o tamanho da poça de fusão, a quantidade de oxidação, a carepa de usina, e o óleo encontrado na superfície do metal de base aumentam, ou mesmo, quando os teores de dióxido de carbono ou de oxigênio aumentam, os teores de manganês e de silício do arame devem também aumentar para proporcionar a melhor qualidade à solda.

AWS	ESAB	C	Mn	Si	S	P	Mo	Outros
ER70S-2	65	0,07	0,90-1,40	0,40-0,70	≤0,035	≤0,025	---	0,05-0,15 Ti 0,02-0,12 Zr 0,05-0,15 Al
ER70S-3	29S ou 82	0,06-0,15	0,90-1,40	0,45-0,75	≤0,035	≤0,025	---	
ER70S-4	85	0,07-0,15	1,00-1,50	0,65-0,85	≤0,035	≤0,025	---	
ER70S-5	---	0,07-0,19	0,90-1,40	0,30-0,60	≤0,035	≤0,025	---	0,50-0,90 Al
ER70S-6	OK 12.51	0,07-0,15	1,40-1,80	0,80-1,15	≤0,035	≤0,025	---	
ER70S-7	87HP	0,07-0,15	1,50-2,00	0,50-0,80	≤0,035	≤0,025	---	
ER80S-D2	83 ou Hi84	0,07-0,12	1,60-2,10	0,50-0,80	≤0,035	≤0,025	0,40-0,60	
ER70S-G	não especificado – requisitos a serem acordados entre o cliente e o fornecedor							

Tabela VI - Requisitos de composição química para arames de aços doces e de baixa liga

Arames de aço inoxidável

Na escolha do arame adequado para a soldagem de aços inoxidáveis existem geralmente alguns aspectos a serem considerados:

- os gases de proteção são normalmente limitados a Ar / 1% O2 para a soldagem em aerossol e 90% He / 7,5% Ar / 2,5% CO2 para curto-circuito. Todos os arames podem ser empregados com qualquer gás;
- os arames são, na maioria das vezes, escolhidos para combinar com a composição química do metal de base;
- os níveis de desoxidantes são de primordial importância. A Tabela VIII mostra os requisitos de composição química e as designações dos arames inoxidáveis abrangidos pela AWS. Diferentemente dos arames de aço carbono, não há requisitos de propriedades mecânicas para o metal de solda depositado.

AWS	ESAB	Gás de Proteção	Corrente e polaridade	L.R. (mín.) (MPa)	L.E. (mín.) (MPa)	Al. (mín.) (%)	Impacto ChV (J)
ER70S-2	65	Al 1,5% O_2 CO_2[1]	CC+	480	400	22	27J @ -29 ºC
ER70S-3	82						27J @ 0 ºC
ER70S-4	85	CO_2[1]					não requerido
ER70S-5	---						
ER70S-6	OK 12.51						27J @ -29 ºC
ER70S-7	87HP						
ER80S-D2	83 ou Hi84					17	
ER70S-G	---	não especificado	não especificado			22	não requerido

1 Ar-CO_2 pode ser usado para todos os arames.

Tabela VII - Requisitos de propriedades mecânicas para arames de aços doces e de baixa liga

Materiais não ferrosos

O alumínio e suas ligas

Os principais elementos empregados para fabricar arames de alumínio para soldagem são o magnésio, manganês, zinco, silício e cobre. A principal razão para adicionar esses elementos é aumentar a resistência mecânica do alumínio puro. Entretanto, a resistência à corrosão e a soldabilidade também merecem atenção. Cada arame contém adições de diversos elementos de liga para melhorar as propriedades da solda, e é desenvolvido para soldar um dado tipo de alumínio. Os arames mais populares são as ligas AWS ER5356 — com adição de magnésio — e a liga AWS ER4043 — com adição de silício.

AWS	C	Cr	Ni	Mo	Nb+Ta	Mn	Si	P	S
ER308	≤0,08	19,5-22,0	9,0-11,0			1,0-2,5	0,25-0,60	≤0,03	≤0,03
ER308L	≤0,03	19,5-22,0	9,0-11,0			1,0-2,5	0,25-0,60	≤0,03	≤0,03
ER309	≤0,12	23,0-25,0	12,0-14,0			1,0-2,5	0,25-0,60	≤0,03	≤0,03
ER310	0,08-0,15	25,0-28,0	20,0-22,5			1,0-2,5	0,25-0,60	≤0,03	≤0,03
ER312	≤0,15	28,0-32,0	8,0-10,5			1,0-2,5	0,25-0,60	≤0,03	≤0,03
ER316	≤0,08	18,0-20,0	11,0-14,0	2,0-3,0		1,0-2,5	0,25-0,60	≤0,03	≤0,03
ER316L	≤0,03	18,0-20,0	11,0-14,0	2,0-3,0		1,0-2,5	0,25-0,60	≤0,03	≤0,03
ER317	≤0,08	18,5-20,5	13,0-15,0	3,0-4,0		1,0-2,5	0,25-0,60	≤0,03	≤0,03
ER318	≤0,08	18,0-20,0	11,0-14,0	2,0-3,0	8xC-1,0	1,0-2,5	0,25-0,60	≤0,03	≤0,03
ER320	≤0,07	19,0-21,0	32,0-35,0	2,0-3,0	8xC-1,0	≤2,5	0,60	≤0,04	≤0,03
ER347	≤0,08	19,0-11,0	9,0-11,0		8xC-1,0	1,0-2,5	0,25-0,60	≤0,03	≤0,03

Tabela VIII - Requisitos de composição química dos arames de aço inoxidável

O modo pelo qual os elementos são combinados para formar as diversas ligas empregadas na soldagem MIG do alumínio aparecem na Tabela IX, que contém também as designações de todos os arames de alumínio listados na especificação AWS A5.10. Não há requisitos de propriedades mecânicas para o metal de solda.

A escolha de arames de alumínio é influenciada pelas mesmas considerações já feitas anteriormente. Novamente a experiência da indústria da soldagem fez a seleção objetivamente. A Tabela X relaciona os arames de alumínio adequados aos vários materiais de base. Algumas combinações entre o arame e o metal de base não aparecem nessa tabela porque normalmente resultam em soldas inferiores.

AWS	Mg	Fe-Si	Fe	Si	Cu	Mn	Cr	Zn	Ni	Ti
ER1100	---	≤1,0	---	---	0,05-20,0	≤0,05	---	≤0,10	---	---
ER1260	---	≤0,40	---	---	≤0,04	≤0,01	---	---	---	---
ER2319	≤0,02	---	≤0,30	≤0,20	5,8-6,8	0,20-0,40	---	≤0,10	---	0,10-0,20
ER4145	≤0,15	---	≤0,80	9,3-10,7	3,3-4,7	≤0,15	≤0,15	≤0,20	---	---
ER4043	≤0,05	---	≤0,80	4,5-6,0	≤0,30	≤0,05	---	≤0,10	---	≤0,20
ER4047	≤0,10	---	≤0,80	11,0-13,0	≤0,30	≤0,15	---	≤0,20	---	---
ER5039	3,3-4,3	----	≤0,40	≤0,10	≤0,03	0,30-0,50	0,10-0,20	2,4-3,2	---	≤0,10
ER5554	2,4-3,0	≤0,40	---	---	≤0,10	0,50-1,0	0,05-0,20	≤0,25	---	0,05-0,20
ER5654	3,1-3,9	≤0,45	---	---	≤0,05	≤0,01	0,15-0,35	≤0,20	---	0,05-0,15
ER5356	4,5-5,5	≤0,50	---	---	≤0,10	0,05-0,20	0,05-0,20	≤0,10	---	0,06-0,20
ER5556	4,7-5,5	≤0,40	---	---	≤0,10	0,50-1,0	0,05-0,20	≤0,25	---	0,05-0,20
ER5183	4,3-5,2	---	≤0,40	≤0,40	≤0,10	0,50-1,0	0,05-0,25	≤0,25	---	≤0,15
R-CN4A	≤0,03	---	≤1,0	≤1,5	4,0-5,0	≤0,35	---	≤0,35	---	≤0,25
R-CN42A	1,2-1,8	---	≤1,0	≤0,70	3,5-4,5	≤0,35	≤0,25	≤0,35	1,7-2,3	≤0,25
R-SC51A	0,40-0,60	---	≤0,80	4,5-5,5	1,0-1,5	≤0,5	≤0,25	≤0,35	---	≤0,25
R-SG70A	0,20-0,40	---	≤0,60	6,5-7,5	≤0,25	≤0,35	---	≤0,35	---	≤0,25

Tabela IX - Requisitos de composição química de arames de alumínio

O cobre e suas ligas

A maioria dos arames de cobre contém elementos de liga. Embora esses elementos geralmente reduzam a condutividade do cobre puro, eles são necessários para aumentar a resistência mecânica, desoxidar o metal de solda e combinar com a composição química do metal de base.

BASE METAL	**319, 333 354, 355 C355**	**13, 43, 344 356, A356 A357, 359**	**214, A214 B214, F214**	**7039 A612, C612 D612, 7005k**		
1060, EC	ER4145*c,i*	ER4043*i,f*	ER4043*e,i*	ER4043*i*	ER4043*i*	ER4043*i*
1100, 3003 Alclad 3003	ER4145*c,i*	ER4043*i,f*	ER4043*e,i*	ER4043*i*	ER4043*i*	ER4043*i*
2014, 2024	ER4145*g*	ER4145	---	---	ER4145	ER4145
2219	ER4145g,*c,i*	ER4145*c,i*	ER4043*i*	ER4043*i*	ER4043*f,i*	ER4043*f,i*
3004 Alclad 3004	ER4043*i*	ER4043*i*	ER5654*b*	ER5356*e*	ER4043*e*	ER4043*b*
5005,5050	ER4043*i*	ER4043*i*	ER5654*b*	ER5356*e*	ER4043*e*	ER4043*b*
5052, 5652*a*	ER4043*i*	ER4043*b,i*	ER5654*b*	ER5356*e,h*	ER5356*b,c*	ER5356*e*
5083	---	ER5356*c,e,i*	ER5356*e*	ER5183*e,h*	ER5356*e*	ER5356*e*
5086	---	ER5356*c,e,i*	ER5356*e*	ER5356*e,h*	ER5356*e*	ER5356*e*
5154, 5254*e*	---	ER4043*b,i*	ER5654*b*	ER5356*b,h*	ER5356*b,c*	ER5356*b,c*
5454	ER4043*i*	ER4043*b,i*	ER5654*b*	ER5356*b,h*	ER5356*b,c*	ER5356*b,c*
5456	---	ER5356*c,e,i*	ER5356*e*	ER5556*e,h*	ER5356*e*	ER5356*e*
6061, 6063 6101, 6201 6151, 6951	ER4145*c,i*	ER4043*b,i*	ER5356*b,c*	ER5356*b,c,h,i*	ER4043*b,i*	ER4043*b,i*
6070	ER4145*c,i*	ER4043*e,i*	ER5356*c,e*	ER5356*c,e,h,i*	ER4043*e,i*	---
7039 A612, C612 D612, 7005k	ER4043*i*	ER4043*b,h,i*	ER5356*b,h*	ER5039*e*	---	---
214, A214 B214, F214	---	ER1013*b,i*	ER5651*b,d*	---	---	---
13, 43, 344 356, A356 A357, 359	ER4145*c,i*	ER4043*d,i*	---	---	---	---
319, 333 354, 355 C355	ER4145*d,c,i*	---	---	---	---	---
BASE METAL	**5456**	**5454**	**5154 5254a**	**5086**	**5083**	**5052 5652a**
1060, EC	ER5356*c*	ER4043*e,i*	ER4043*e,i*	ER5356*c*	ER5356*c*	ER4043*i*
1100, 3003	ER5356*c*	ER4043*e,i*	ER4043*e,i*	ER5356*c*	ER5356*c*	ER4043*e,i*
2014, 2024	---	---	---	---	---	---
2219	ER4043	ER4043*i*	ER4043*i*	ER4043	ER4043	ER4043*i*
3004 Alclad 3004	ER5356*e*	ER5654*b*	ER5654*b*	ER5356*e*	ER5356*e*	ER4043*e,i*
5005, 5050	ER5356*e*	ER5654*b*	ER5654*b*	ER5356*e*	ER5356*e*	ER4043*e,i*
5052, 5652*a*	ER5356*b*	ER5654*b*	ER5654*b*	ER5356*e*	ER5356*e*	ER5654*a,b,c*
5083	ER5183*e*	ER5356*e*	ER5356*e*	ER5356*e*	ER5183*e*	---

5086	ER5356*e*	ER5356*b*	ER5356*b*	ER5356*e*	---	---
5154, 5254*e*	ER5356*b*	ER5654*b*	ER5654*a,b*	---	---	---
5454	ER5356*b*	ER5554*c,d*	---	---	---	---
5456	ER5556*e*	---	---	---	---	---
BASE METAL	**5005 5050**	**3004 Alc. 3004**	**2219**	**2014 2024**	**1100 3003 Alc. 3003**	**1060 EC**
1060, EC	ER1100*c*	ER4043	ER4145	ER4145	ER1100*c*	ER1260*e,j*
1100, 3003 Alclad 3003	ER4043*e*	ER4043*e*	ER4145	ER4145	ER1100*c*	---
2014, 2024	---	---	ER4145*g*	ER4145g	---	---
2219	ER4043	ER4043	ER2319*c,f,i*	---	---	---
3004 Alclad 3004	ER4043*e*	ER4043*e*	---	---	---	---
5005, 5050	ER4043*d,e*	---	---	---	---	---

Tabela X - Adequação dos arames de alumínio aos materiais de base

Notas da Tabela X:
NOTA 1: condições de serviço como imersão em água corrente ou salmoura, exposição a agentes químicos ou a altas temperaturas (acima de 65°C pode limitar a escolha de metais de adição.
NOTA 2: as recomendações dessa tabela aplicam-se aos processos com gás de proteção.
Para o gás de soldagem, apenas os metais de adição R1100, R1260 e R4043 podem ser normalmente utilizados.
NOTA 3: os metais de adição designados com o prefixo ER são listados na especificação AWS A5.10
a) metais de base das ligas 5652 e 5254 são usados para serviços com peróxido de hidrogênio; o metal de adição ER5654 é empregado na soldagem de ambas as ligas para baixas temperaturas de serviço (65°C e abaixo);
b) os arames ER5183, ER5356, ER5554, ER5556 e ER5654 podem ser empregados; em alguns casos eles proporcionam (1) melhor composição de cores depois do tratamento de anodização, (2) a maior ductilidade da solda, e (3) maior resistência à solda; o arame ER5554 é adequado para serviço a altas temperaturas;
c) o arame ER4043 pode ser utilizado em algumas aplicações;
d) metais de adição com a mesma composição química do metal de base são algumas vezes empregados;
e) podem ser empregados os arames ER5183, ER5356 ou ER5556;
f) o arame ER4145 pode ser utilizado em algumas aplicações;
g) o arame ER2319 pode ser utilizado em algumas aplicações;
h) o arame ER5039 pode ser utilizado em algumas aplicações;
i) o arame ER4047 pode ser utilizado em algumas aplicações;
j) o arame ER1100 pode ser utilizado em algumas aplicações;
k) refere-se apenas às extrusões do 7005.
NOTA 4: onde não constar o metal de adição, a combinação entre os metais de base não é recomendada para a soldagem.

A Tabela XI e a Tabela XII mostram os diversos arames de cobre e suas ligas e a resistência à tração requerida para corpos de prova transversais do metal de solda. Primeiramente, a seleção de um arame adequado depende da composição química do material de base; no entanto, isso nem sempre é possível. Mais uma vez a escolha não depende do gás de proteção, pois apenas o argônio e o hélio são recomendados. As aplicações dos diversos arames de cobre e suas ligas são as seguintes:

ERCu – por causa do baixo teor de elementos de liga, os arames ERCu são restritos à soldagem do cobre puro. O cobre desoxidado e livre do oxigênio pode ser soldado sem defeitos internos e com boa resistência. Entretanto, o cobre eletrolítico não deve ser soldado com o arame ERCu se houver requisitos de qualidade para a solda.

ERCuSi-A – esse arame é principalmente utilizado para soldar ligas de cobre-silício, visto que sua composição química combina melhor. Além disso, pode ser empregado para soldar ligas de cobre-zinco. Graças ao alto teor de silício e à resultante desoxidação da poça de fusão, o cobre eletrolítico pode ser adequadamente soldado. Nesse caso, a integridade e as propriedades mecânicas serão superiores às das soldas feitas com arames ERCu. Os arames ERCuSi também apresentam um desempenho similar ao dos arames de aço doce com respeito à estabilidade do arco e à fluidez da poça de fusão. Assim, a soldagem de chapas de aço carbono e de aço galvanizado pode ser realizadas com sucesso.

ERCuSn-A – os arames com essa classificação são principalmente utilizados na soldagem de bronzes fosforosos, porém podem ser empregados na soldagem do ferro fundido e do aço doce.

Mais uma vez, graças à capacidade de desoxidação do fósforo, eles podem ser usados na soldagem do cobre eletrolítico. Entretanto, os arames ERCuSnA não proporcionam uma poça de fusão fluida, de modo que pode ser necessário um pré-aquecimento. Ligas de cobre-zinco também podem ser soldadas.

ERCuSn-C – esse arame é empregado no lugar do arame ERCuSn-A quando são necessários maiores dureza, resistência mecânica e tensão limite de escoamento. Para alcançar uma boa ductilidade é necessário um tratamento térmico pós-soldagem. Em ligas de cobrezinco será alcançada uma melhor harmonia de cores entre o metal de base e o metal de solda com o arame ERCuSn-C.

ERCuA1-A2 – os arames ERCuA1-A2 são extremamente úteis porque podem ser utilizados para soldar uma variedade de ligas de cobre e metais ferrosos. Graças ao teor mais elevado de alumínio e às adições de ferro, a solda resultante será mais forte e mais dura do que as soldas feitas com o arame ERCuA1-A1. Os materiais soldados com esse arame são bronzes ao alumínio de composição química similar às ligas 612, 613 e 618. Também podem ser soldados latões amarelos, ligas de cobre-zinco de alta resistência, silício, bronze, aço carbono e revestimento de cobre ou ligas de cobre em aço. Fundidos com alto teor de alumínio como as ligas 952 e 958 são também soldadas com esse arame, que também pode ser empregado em revestimentos resistentes à corrosão e ao desgaste.

AWS	ESAB	NOME COMUM	Zn	Sn	Mn	Fe	Si	Ni+Co	P	Al	Pb	Ti	Total Outros
ERCU	DEOX-CU	COBRE	---	≤1,0	≤0,5	---	≤0,5	---	≤0,15	≤0,01	≤0,02	---	≤0,50
ERCUSi	SI-BRONZE	COBRE-SILÍCIO (BRONZE AO SILÍCIO)	---	≤1,5	≤1,50	≤0,5	2,8-4,0	---	---	≤0,01	≤0,02	---	≤0,50
ERCUSN-A	PHOS-BRONZE C	COBRE-ESTANHO (BRONZE FOSFOROSO)	---	4,0-6,0	---	---	---	---	0,10-0,35	≤0,01	≤0,02	---	≤0,50
ERCUSN-C	PHOS-BRONZE C		---	7,0-9,0	---	---	---	---	0,05-0,35	≤0,01	≤0,02	---	≤0,50
ERCUNi	---	COBRE - NÍQUEL	---	---	≤1,0	0,40-0,75	≤0,50	≥29,0	---	---	≤0,02	0,15-1,00	≤0,50
ERCUAl-A2	AL BRONZE AZ	COBRE-ALUMÍNIO	≤0,02	---	---	≤1,5	≤0,10	---	---	9,0-11,0	≤0,02	---	≤0,50
ERCUAl-B	---		≤0,20	---	---	3,0-4,25	≤0,10	---	---	11-12	≤0,02	---	≤0,50

Tabela XI - Requisitos de composição química dos arames de cobre (AWS A5.6-69)

AWS	ESAB	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	
		psi	MPa
ERCU	DEOX-CU	≥25.000	≥175
ERCUSi	SI-BRONZE	≥50.000	≥345
ERCUSN-A	PHOS-BRONZE C	≥35.000	≥240
ERCUSN-C	PHOS-BRONZE C	≥40.000	≥275
ERCUNi	---	≥50.000	≥345
ERCUAl-A2	AL BRONZE AZ	≥60.000	≥415

Tabela XII - Requisitos de resistência à tração dos arames de cobre e suas ligas

Capítulo 6

SEGURANÇA

Fumos e gases

FUMOS e GASES podem prejudicar sua saúde. Mantenha sua cabeça longe dos fumos. Não respire os fumos e os gases causados pelo arco elétrico. Certifique-se de manter uma ventilação suficiente. O tipo e a quantidade de fumos e gases dependem do equipamento, das condições de trabalho e dos consumíveis usados. Devem ser colhidas amostras de ar em cada condição de trabalho para determinar quais equipamentos protetores são necessários.

Tome providências para ter sempre uma ventilação suficiente sempre que forem realizadas atividades de soldagem e corte. A ventilação adequada protegerá o operador dos fumos e dos gases nocivos desprendidos. O tipo de ventilação dependerá da atividade específica de soldagem e corte e variará com o tamanho da área de trabalho, do número de operadores e do tipo de materiais a serem soldados ou cortados. Podem existir materiais potencialmente perigosos em certos fluxos, revestimentos e materiais de adição. Eles podem ser liberados para a atmosfera durante a soldagem e o corte. Em alguns casos a ventilação natural pode ser adequada. Outras atividades podem requerer ventilação forçada, coifas de exaustão, filtros individuais de respiração ou máscaras com suprimento de ar. A soldagem dentro de tanques, caldeiras ou de outros espaços confinados requerem procedimentos especiais tais como o uso de toucas ou máscaras com suprimento de ar.

Verifique a atmosfera no ambiente de soldagem e o sistema de ventilação se os operários desenvolverem sintomas pouco comuns ou se fizerem alguma reclamação. Podem ser necessárias algumas medições para determinar se está sendo proporcionada uma ventilação adequada. Um profissional qualificado da área de segurança do trabalho deve fiscalizar o ambiente e as atividades de soldagem. Devem ser seguidas suas recomendações para melhorar a ventilação da área de trabalho.

Não se deve soldar em chapas sujas ou contaminadas com material desconhecido. Os fumos e gases que se desprenderem podem ser prejudiciais à saúde. Tintas e revestimentos galvanizados antes da soldagem. Todos os fumos e gases podem ser considerados como potencialmente perigosos.

CHOQUE ELÉTRICO

O choque elétrico pode matar você.

Não toque em peças energizadas.

O choque elétrico deve ser evitado. Devem ser seguidas as recomendações abaixo. Instalação defeituosa, esmerilhamento inadequado, e operação e manutenção incorretas de equipamento elétrico são sempre fontes de perigo.

- Aterre todos os equipamentos elétricos e a peça de trabalho. Evite choques elétricos acidentais. Conecte a fonte, os controladores e a peça de trabalho a um aterramento elétrico aprovado.

O cabo condutor não é aterrado, serve para fechar o circuito de soldagem. É necessária uma conexão separada para aterrar a peça (veja a Figura 20); ou então o terminal da fonte pode ser conectado ao terra. Não confunda o cabo condutor conectado à peça com o cabo terra.

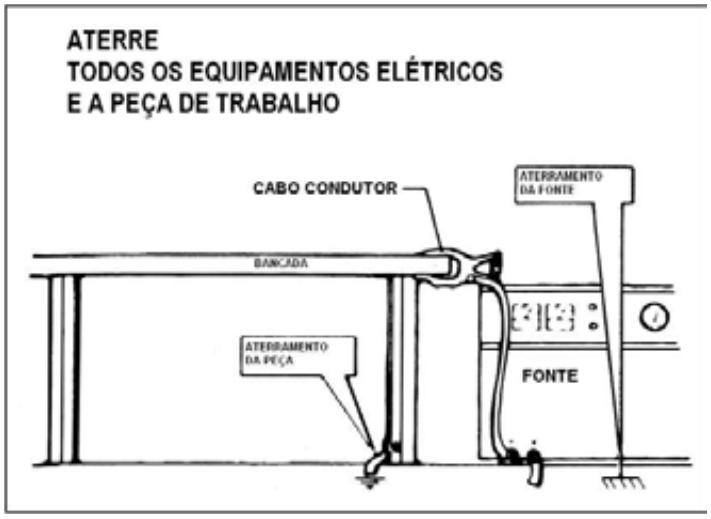


Figura 20 - Aterramento

- **Use o diâmetro correto de cabo**. Uma sobrecarga prolongada causará a falha do cabo e resultará em possível choque elétrico ou risco de incêndio. O cabo conectado à peça deve ser do mesmo padrão que o cabo da tocha.
- **Certifique-se que todas as conexões elétricas estejam apertadas, limpas e secas**. Conexões elétricas deficientes podem aquecer e mesmo fundir. Elas podem também causar soldas ruins e produzir arcos perigosos e centelhamento. Não deixe que a umidade, graxa ou sujeira se acumulem nos conectores, nos soquetes ou nas unidades elétricas.
- **Mantenha tudo seco**. A umidade e a água podem conduzir eletricidade. Para evitar o choque, é aconselhável manter sempre secas as áreas de trabalho, os equipamentos e as roupas. Conserte vazamentos de água imediatamente. Certifique-se de que tudo se encontra isolado. Use luvas secas, sapatos com sola de borracha ou então permaneça numa plataforma ou num estrado seco.
- **Mantenha os cabos e as conexões em boas condições**. Conexões elétricas inadequadas ou desgastadas podem causar curtos- circuitos e pode aumentar a probabilidade de choques elétricos. Não utilize cabos desgastados, danificados ou desencapados.
- **Evite a tensão de circuito aberto**. A tensão de circuito aberto pode causar choque elétrico. Quando vários soldadores estiverem trabalhando com arcos de polaridade diferente, ou quando estiverem utilizando equipamentos de corrente alternada múltipla, as tensões de circuito aberto podem ser aditivas. As tensões adicionadas aumentam a severidade do risco de choque.
- **Use luvas isoladas quando estiver regulando o equipamento**. A energia deve ser desligada e devem ser usadas luvas isoladas quando se fizerem ajustes nos equipamentos para assegurar proteção contra choques.

RADIAÇÃO E RESPINGOS

A radiação do arco elétrico e os respingos podem causar danos aos olhos e queimar a pele. Use proteções adequadas para os olhos, ouvidos e para o corpo.

A radiação do arco elétrico pode queimar os olhos e a pele da mesma forma que a luz forte do sol. Arcos elétricos emitem tanto raios ultravioletas quanto infravermelhos. Os soldadores e as pessoas próximas ao local de soldagem podem queimar os olhos e a pele após breve exposição à radiação do arco elétrico. A vermelhidão da pele causada pelos raios ultravioletas torna-se aparente depois de sete ou oito horas. Longas exposições podem causar queimaduras graves na pele. Os olhos podem ser gravemente queimados tanto pelos raios ultravioletas quanto pelos infravermelhos. Respingos de solda quentes podem causar queimaduras dolorosas na pele e danos permanentes aos olhos.

Para se ter certeza de uma completa proteção para os olhos contra a radiação e os respingos, devem ser seguidas as precauções:

- **Cubra toda a pele e use óculos de segurança para proteção contra queimaduras do arco, de centelhas ou de respingos**. Mantenha as mangas abaixadas. Use luvas, máscara e capacete. Use também as lentes protetoras adequadas para evitar danos aos olhos. Escolha o grau correto da lente conforme a Tabela XIII.. O pessoal próximo também deve utilizar lentes de proteção.

Aplicação MIG/MAG (arame sólido e arame tubular)	Lentes nº *
60 - 160 A	11
160 - 250 A	12
250 - 500 A	14

Tabela XIII - Recomendações de filtros

* Como regra geral, inicie com uma lente que seja muito escura para enxergar a região do arco. Mude então de lente até enxergar o arco sem causar tensões aos olhos.

- **Proteja-se contra as centelhas do arco ou outros acidentes**. Use óculos de proteção ou lentes com filtro no 2 na máscara. Ajudantes e o pessoal próximo também devem utilizar uma proteção similar.
- **Use roupas de proteção como jaquetas, aventais e perneiras resistentes ao calor**. A exposição prolongada à intensa radiação do arco pode causar danos. Roupas finas de algodão não se constituem numa proteção adequada. O algodão se deteriora sob esse tipo de radiação.
- **Use botas de segurança**. Evite usar sapatos baixos, que podem permitir a entrada de respingos quentes.
- **Use calças sem bainhas externas**. Usando calças sem bainhas externas, elimina-se o perigo de um respingo ou uma centelha serem aprisionados pela bainha da calça. As pernas da calça devem ficar por cima das botas de segurança para evitar que os respingos caiam penetrem nas botas.
- **Use roupas limpas**. Não use roupas manchadas de óleo ou de graxa. As manchas podem queimar em contato com o calor do arco.
- **Use proteção para os ouvidos**, não só onde houver ruído, mas também onde existir uma chance de que respingos ou fagulhas penetrem neles.
- **Use uma touca** para proteger a cabeça de fagulhas ou de respingos.
- **Proteja seus colegas de trabalho próximos da exposição à radiação do arco**. Bloqueie seu local de trabalho com biombos de metal ou de material resistente ao calor. Se o local não puder ser protegido, todos num raio de aproximadamente 25 m devem usar proteção para os olhos quando houver atividade de soldagem ou de corte.

Capítulo 7

TÉCNICAS E PARÂMETROS DE SOLDAGEM

Efeitos na solda

Depois de ter selecionado o arame e o gás para a soldagem, as condições de operação devem ser escolhidas. Os quatro parâmetros mais importantes são a corrente de soldagem, a extensão do eletrodo, a tensão de soldagem e a velocidade de soldagem. Esses parâmetros afetarão as características da solda de uma forma marcante. Como esses fatores podem ser variados em faixas bem largas, são considerados os ajustes primários em qualquer atividade de soldagem. Seus valores devem ser registrados para qualquer tipo diferente de solda para permitir reprodutibilidade.

A corrente de soldagem

A corrente de soldagem é a amperagem de saída da fonte quando a solda está sendo realizada. É normalmente lida no indicador da fonte, podendo também ser lida através de um amperímetro separado.

No processo MIG/MAG a corrente de soldagem está diretamente relacionada à velocidade de alimentação do arame (desde que a extensão do eletrodo seja constante). Quando a velocidade de alimentação do arame é alterada, a corrente de soldagem varia no mesmo sentido. Em outras palavras, um aumento (ou diminuição) na velocidade de alimentação do arame causará um aumento (ou diminuição) da corrente de soldagem. A Figura 21 mostra a relação típica entre a velocidade de alimentação do arame e a corrente de soldagem para diversos diâmetros do arame ER70S-3. Essa relação é normalmente denominada característica de queima. O gráfico também mostra que quando o diâmetro do arame aumenta (ou diminui) para qualquer diâmetro de arame, a corrente de soldagem aumenta (ou diminui). Cada tipo de arame (aço, alumínio, etc.) tem uma característica de queima diferente.

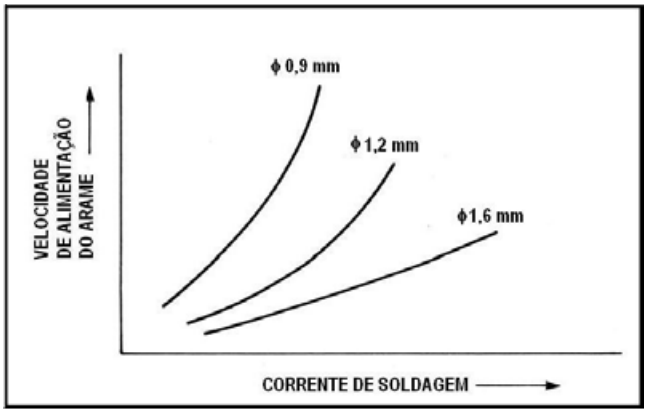


Figura 21 - Características de queima

Um fato importante que deve ser observado na Figura 21 é a forma de cada curva de queima. Sob correntes mais baixas para qualquer diâmetro de arame a curva é quase linear. Em outras palavras, para cada aumento da corrente de soldagem, ocorre um aumento proporcional (e constante) na queima. No entanto, a maiores correntes de soldagem, particularmente com arames de diâmetros pequenos, a curva de queima torna-se não linear. Nessa região, correntes de soldagem mais altas causam maiores aumentos na queima. Isso é devido ao aquecimento pela resistência à passagem da corrente elétrica na extensão do eletrodo além do bocal. Esse aquecimento resistivo é conhecido como efeito Joule (I^2R), e quanto maior a corrente de soldagem, maior o aquecimento resistivo.

Extensão do eletrodo

A extensão do eletrodo (*stick-out*) é a distância entre o último ponto de contato elétrico, normalmente a extremidade do bico de contato, e a peça de trabalho. A Figura 22 mostra esquematicamente a extensão do eletrodo. É nessa região que ocorre o efeito Joule (I^2R).

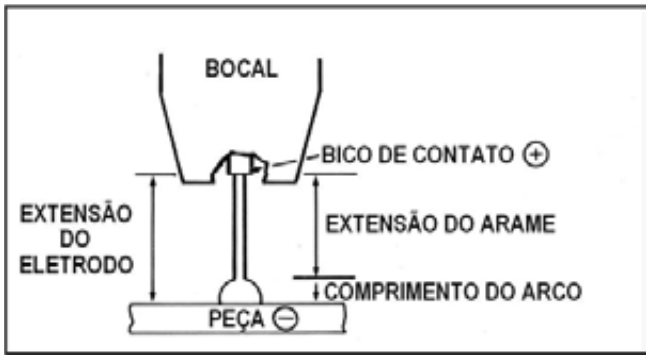


Figura 22 - Distância entre o bico de contato e a peça

A distância entre o bico de contato e a peça (extensão do eletrodo) afeta a corrente de soldagem necessária para fundir o arame a uma dada velocidade de alimentação de arame. A Figura 23 ilustra a dimensão da variação da corrente de soldagem com a distância do bico de contato à peça. Basicamente, quando essa distância é aumentada, o aquecimento devido ao efeito Joule aumenta e a corrente de soldagem necessária para fundir o arame é diminuída e viceversa.

Figura 23 - Efeito da distância entre o bico de contato e a peça na corrente de soldagem

É importante controlar a distância entre o bico de contato e a peça. Grandes extensões de eletrodo resultam em excesso de metal de solda sendo depositado com baixo calor do arco. Isso pode causar geometria desfavorável do cordão e baixa penetração. Adicionalmente, quando a distância do bico de contato à peça aumenta, o arco torna- se menos estável. Na soldagem por curto-circuito é recomendada uma distância entre o bico de contato e a peça de 10 mm. É muito importante que a extensão do eletrodo seja mantida constante durante a atividade de soldagem. Tendo em vista o substancial efeito na atividade de soldagem, é sempre bom registrar não só a corrente e a tensão, mas também a velocidade de alimentação do arame.

A tensão de soldagem

Embora já discutida no Capítulo 3, deve ser enfatizado que o ajuste da tensão de soldagem controla diretamente o comprimento do arco. Além disso, é necessária uma certa faixa para manter a estabilidade do arco a qualquer nível de corrente de soldagem.

Velocidade de soldagem

A velocidade de soldagem é a relação entre o caminho percorrido pelo arco ao longo da peça e o tempo gasto para percorrê-lo. Esse parâmetro é normalmente expresso em cm/min ou mm/min. Três regras gerais podem ser enunciadas com respeito à velocidade de soldagem:

- quando a espessura da peça aumenta a velocidade de soldagem deve diminuir;
- para uma dada espessura de peça e tipo de junta, quando a corrente de soldagem aumentar a velocidade de soldagem também deve aumentar e vice-versa;
- maiores velocidades de soldagem são alcançadas empregando a técnica de soldagem empurrando.

Técnicas de soldagem

A primeira técnica geral de soldagem que afeta as características da solda é a posição da tocha. Ela se refere à maneira pela qual a tocha é mantida relativamente ao cordão de solda. A posição da tocha é normalmente definida em duas direções — o ângulo relativo ao comprimento do cordão e o ângulo relativo às chapas, como está ilustrado na Figura 24 e na Figura 25, respectivamente. Ambas as técnicas de soldagem puxando e empurrando são mostradas na Figura 24. Na técnica puxando a tocha é posicionada de tal modo que o arame seja alimentado no sentido oposto ao do deslocamento do arco. O arame é adicionado ao metal de solda já depositado. Na técnica empurrando a tocha é posicionada de tal modo que o arame seja alimentado no mesmo sentido do deslocamento do arco. Nessa técnica o arame é adicionado, em sua maior parte, diretamente na peça. Deve ser observado que não é necessária qualquer alteração no sentido de soldagem para facilitar a soldagem puxando ou empurrando, mas apenas uma mudança no posicionamento longitudinal da tocha. Geralmente os soldadores acham que a técnica de soldagem puxando proporciona um arco mais estável e menos respingos na peça.

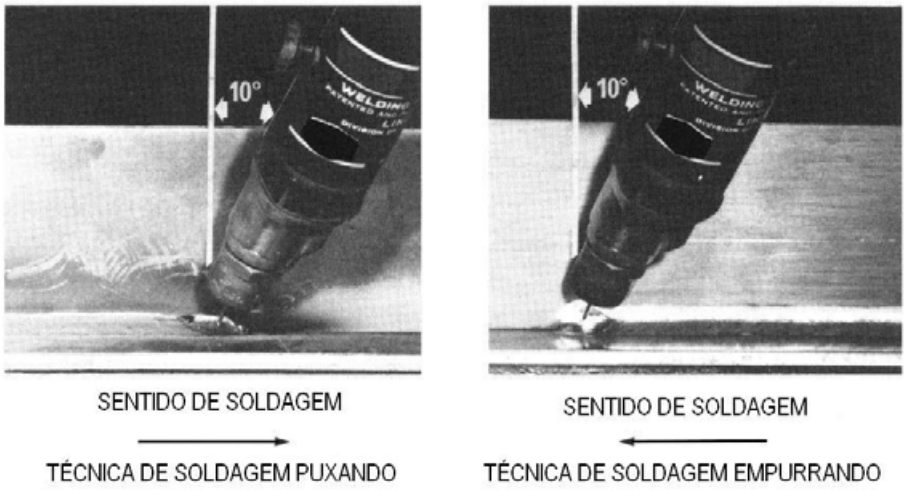


Figura 24 - Posições longitudinais da tocha

O ângulo relativo com a chapa para uma junta em ângulo mostrado na Figura 25 é normalmente 45°. Entretanto, para uma junta de topo biselada, esse ângulo pode ficar quase na vertical para permitir uma molhabilidade adequada do metal de solda nas paredes do chanfro.

A segunda técnica geral de soldagem que deve ser considerada é o sentido de soldagem quando esta deve ser realizada na posição vertical. Como a Figura 26 ilustra, existem duas progressões pelas quais a soldagem pode ser executada - a ascendente e a descendente.

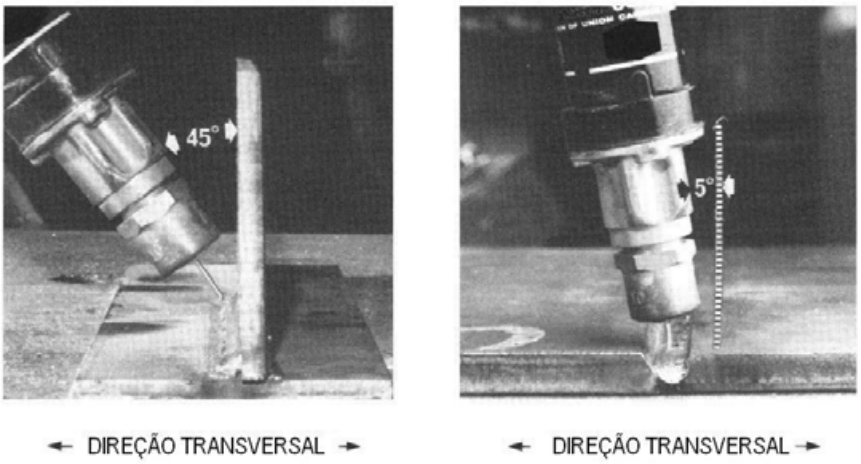


Figura 25 - Posições transversais da tocha

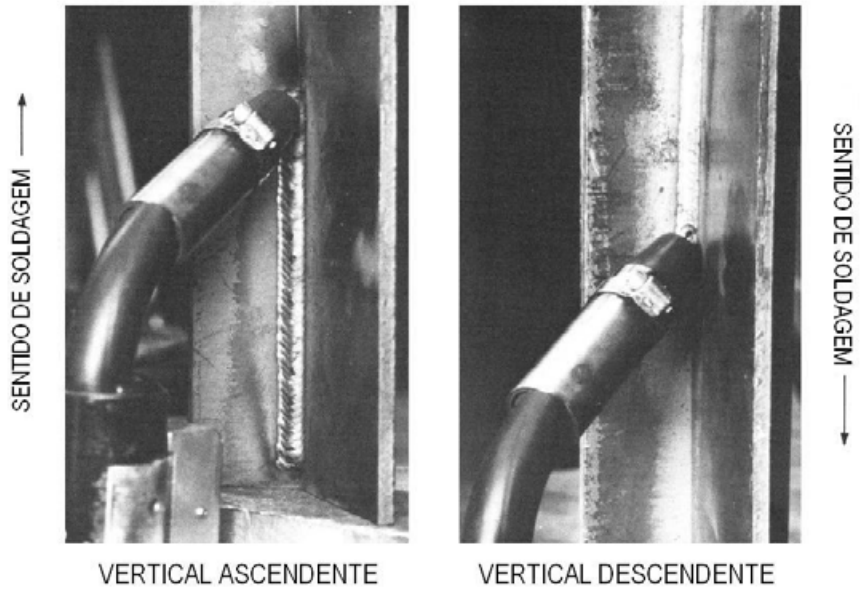


Figura 26 - Soldagem nas progressões ascendente e descendente

Nesse caso o posicionamento da tocha é extremamente importante, e a soldagem deve ser realizada somente como ilustrado. Em ambos os casos o arco deve ser mantido na borda da poça de fusão para assegurar uma penetração completa da solda.

Essas informações completam uma definição dos fatores que tornam controláveis as técnicas e os parâmetros de soldagem. Enfoquemos agora o modo como cada um desses fatores afetam certas características do cordão de solda.

CARACTERÍSTICAS DO CORDÃO DE SOLDA

Penetração

A penetração de solda é a distância que a linha de fusão se estende abaixo da superfície do material sendo soldado.

A corrente de soldagem é de primordial importância na penetração. Como ilustra a Figura 27, a penetração da solda é diretamente proporcional à corrente de soldagem. Um aumento ou uma diminuição na corrente aumentará ou diminuirá a penetração da solda, respectivamente.

Entretanto, tem sido observado que a corrente de soldagem pode ser variada sem alteração da velocidade de alimentação do arame, particularmente através da variação da extensão do eletrodo (distância entre o bico de contato e a peça). O efeito da extensão do eletrodo na penetração da solda é de natureza oposta ao da corrente de soldagem. Um aumento na extensão do eletrodo diminuirá a corrente de soldagem e a penetração da solda e vice-versa. Em algumas aplicações muitos soldadores acham útil recorrer a essa propriedade para controlar a penetração. Alterações na extensão do eletrodo durante a soldagem evitam furar a raiz quando existirem variações na espessura da peça ou na abertura da raiz.

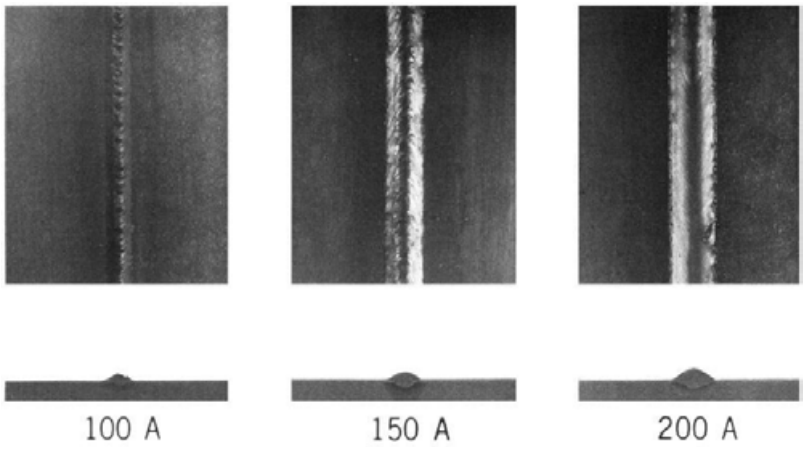


Figura 27 - Efeito da corrente de soldagem na penetração da solda – aço carbono, curto-circuito, Ar-25%CO_2

Os demais fatores possuem um efeito comparativamente pequeno na penetração e não proporcionam um bom instrumento de controle. A Figura 28 ilustra o efeito da tensão de soldagem. Nesse exemplo a penetração é maior com 24 V e diminui quando a tensão é aumentada ou diminuída. A tensão ótima para a corrente empregada é de 24 V e garante o arco mais estável. A instabilidade do arco diminui a penetração.

Os efeitos da velocidade de soldagem são similares aos da tensão de soldagem — a penetração é máxima para um determinado valor e diminui quando a velocidade de soldagem é alterada. A Figura 29 mostra que a uma velocidade de soldagem de 30 cm/min a penetração é máxima. A 18 cm/min e a 45 cm/min a penetração diminui. A velocidades de soldagem mais baixas há o depósito de muito metal de solda fundido, que acaba causando um efeito de almofadamento do metal de base, reduzindo a penetração. A maiores velocidades de soldagem não há tempo suficiente para que o calor gerado pelo arco funda substancialmente a região apropriada do metal de base.

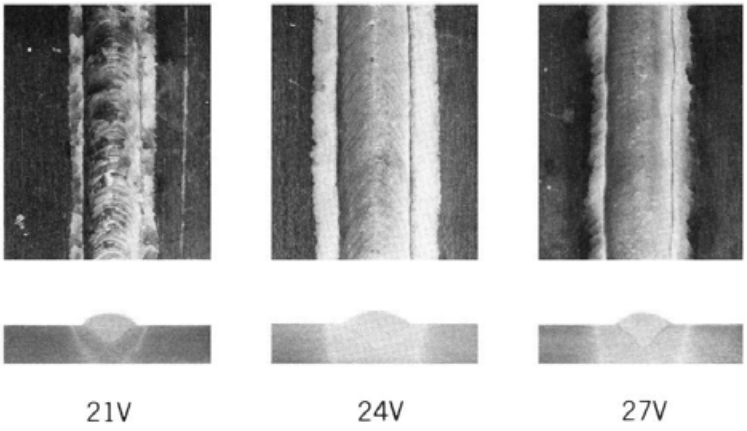


Figura 28 - Efeito da tensão de soldagem na penetração da solda – alumínio, aerossol, argônio.

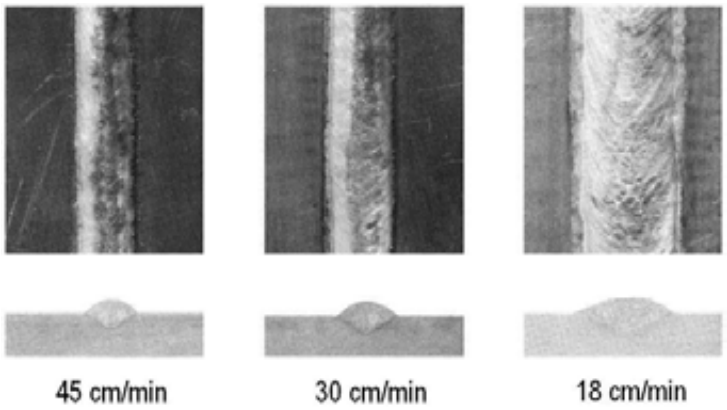


Figura 29 - Efeito da velocidade de soldagem na penetração da solda – alumínio, aerossol, argônio.

A posição da tocha tem um efeito ligeiramente maior que a tensão e a velocidade de soldagem. O efeito da alteração do ângulo da tocha ou de mudar de uma técnica de soldagem empurrando para puxando é mostrado na Figura 30. Pode ser observado que geralmente a técnica de soldagem empurrando assegura uma penetração mais rasa que a técnica de soldagem puxando. A penetração máxima é alcançada com um ângulo de tocha de 25° e aplicando-se a técnica de soldagem puxando. Entretanto, além desse ângulo de tocha, aumentarão a instabilidade do arco e a quantidade de respingos. Em materiais de pequena espessura ou onde for necessária uma pequena penetração, é geralmente empregada a técnica de soldagem empurrando.

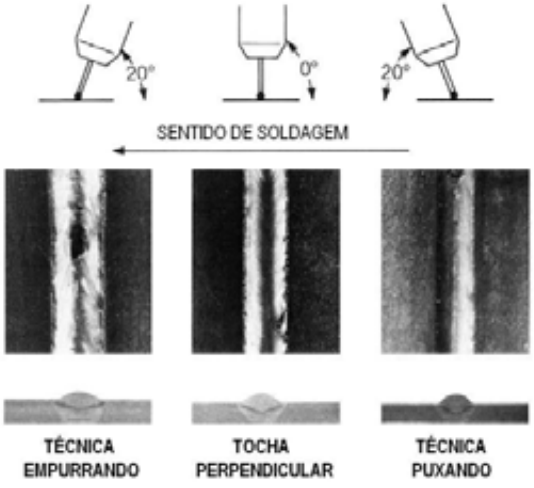


Figura 30 - Efeito da posição longitudinal da tocha na penetração da solda.

Taxa de deposição

A taxa de deposição descreve o quanto de metal de solda será depositado numa hora de arco aberto. Como o processo MIG/MAG é muito eficiente, apenas uma pequena quantidade de metal de solda será perdida na forma de respingos. A taxa de deposição para qualquer arame é calculada pela Equação [2]:

$$[2] \quad \text{taxadedeposição(kg/ h)} = \frac{\text{vel.alim.arame(m/min) 60min/ h}}{\text{m/ kg de arame}}$$

A Tabela XIV informa a quantidade de metros por quilo de diversos tipos e diâmetros de arame.

Material \ Diâmetro	0,76 mm	0,80 mm	0,89 mm	1,00 mm	1,14 mm	1,18 mm	1,20 mm	1,58 mm	2,38 mm
Aço doce	276,9	250,9	203,9	160,4	122,7	---	111,5	64,4	28,8
Aço inoxidável (3XX)	272,2	---	200,5	---	120,7	---	---	63,7	28,2
Alumínio	805,3	---	592,1	---	---	358,1	---	188,4	83,8
Cobre	243,4	---	178,4	---	108,0	---	---	57,0	24,1
Bronze ao Silício	256,8	---	188,4	---	114,0	---	---	59,7	26,8

Tabela XIV - Quantidade de metros por quilo de arames de solda

Taxa de deposição é sinônimo de velocidade de alimentação do arame. A Figura 31 mostra a variação da taxa de deposição com a corrente de soldagem. A corrente necessária para alcançar uma determinada taxa de deposição também pode ser alterada variando-se a extensão do eletrodo. Como mostra a Figura 32, a velocidade de alimentação do arame pode ser aumentada com o aumento da extensão do eletrodo para manter constante a corrente de soldagem. Isso resulta numa taxa de deposição maior que a normalmente associada com um dado nível de corrente.

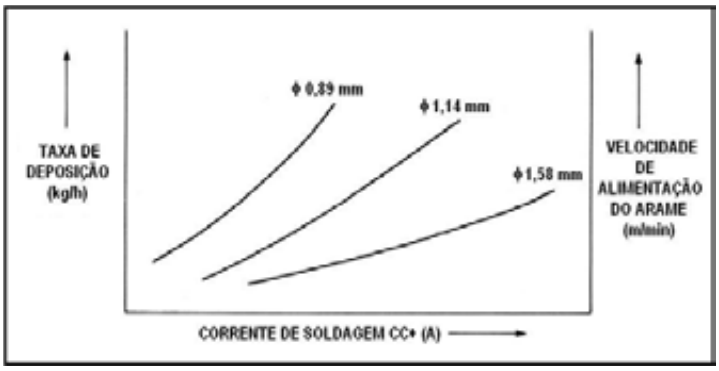


Figura 31 - Taxa de deposição versus corrente de soldagem

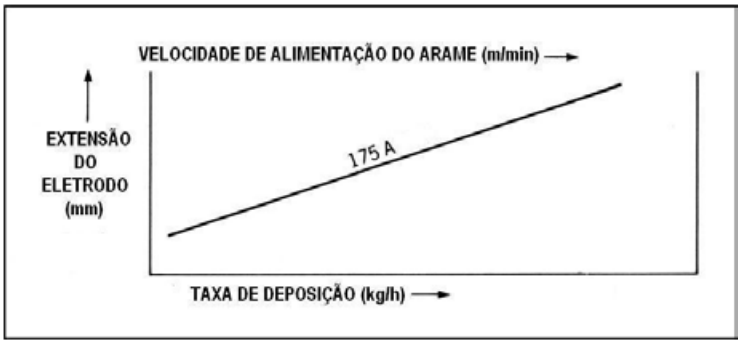


Figura 32 - Efeito da extensão do eletrodo na taxa de deposição

Longas extensões de eletrodo e altas velocidades de alimentação de arame são empregadas na soldagem de peças finas a altas velocidades, onde pode ser mantida uma baixa corrente de soldagem. Normalmente é empregada a técnica de soldagem empurrando. O aumento da taxa de deposição dessa maneira terá também um efeito na penetração da solda. Como mais metal está sendo depositado para a mesma corrente de soldagem, a penetração será reduzida. Isso resulta de um amortecimento da força do arco pelo material de solda extra depositado.

Aparência do cordão de solda

Duas características do cordão de solda são sua altura e largura, conforme é mostrado na Figura 33. Essas características são importantes para garantir que a junta de solda seja adequadamente preenchida, com um mínimo de defeitos, particularmente em soldas multipasses. Nesse caso, se a altura do cordão de solda for muito grande, torna-se muito difícil depositar os passes de solda subsequentes com boa fusão. Quanto mais protuberante e estreito for o cordão de solda, maior a probabilidade de ocorrer falta de fusão. As características do cordão de solda podem ser alteradas em seu tamanho e/ou em sua forma.

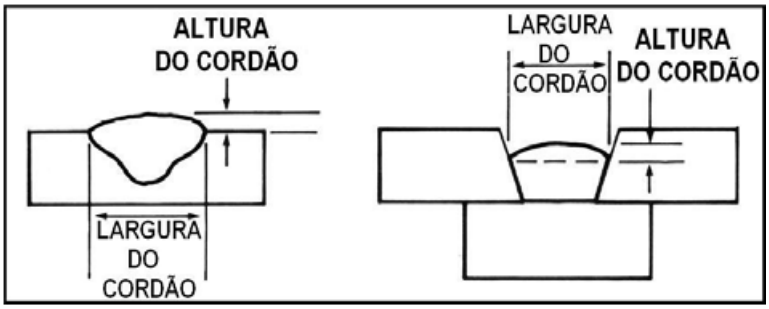


Figura 33 - Características do cordão de solda

Para alterar o tamanho do cordão de solda, deve ser mudada a quantidade de metal de solda depositado (kg) por unidade de comprimento linear da solda (m). A corrente e a velocidade de soldagem são os parâmetros mais influentes no controle do tamanho do cordão de solda. Por exemplo, quando a corrente de soldagem é diminuída, o cordão de solda torna-se menor e vice-versa. Essa relação pode ser observada na Figura 27.

O tamanho do cordão de solda também pode ser modificado variando-se a velocidade de soldagem. Como pode ser observado na Figura 29, o tamanho do cordão de solda e a velocidade de soldagem são inversamente relacionados. Uma diminuição na velocidade de soldagem resultará num aumento da largura e da altura do cordão de solda e vice-versa. Novamente os quilos de metal de solda depositado num metro linear de solda são aumentados (ou diminuídos).

Tanto a corrente como a velocidade de soldagem possue um pequeno efeito na geometria (forma) do cordão de solda. A largura e a altura do cordão de solda aumentam ou diminuem conjuntamente.

A tensão de soldagem é usada para controlar a forma do cordão de solda. Como pode ser visto da Figura 28, quando a tensão do arco (ou o comprimento do arco) aumenta, a altura do cordão de solda diminui e sua largura aumenta. Nesse caso o tamanho total do cordão de solda permanece constante. Somente a forma ou o contorno do cordão é modificado. Aumentando-se a largura do cordão de solda, seu topo torna-se mais achatado e o metal de solda "molha" os materiais de base mais eficientemente. Melhora a fusão do metal de base.

A extensão do eletrodo e a técnica de soldagem empregada (puxando ou empurrando) também afetam essas características, mas apenas até um certo limite. Quando são empregadas longas extensões de eletrodo para aumentar a taxa de deposição, a altura do cordão de solda aumentará numa proporção maior que sua largura. Embora mais largo, o cordão de solda torna-se mais protuberante (topo mais convexo), como é mostrado na Figura 34. A técnica de soldagem puxando também produzirá cordões de solda altos e estreitos. Diminuindo- se o ângulo longitudinal

da tocha a altura do cordão de solda diminuirá e sua largura aumentará. A técnica de soldagem empurrando garante o cordão de solda mais achatado e mais largo.

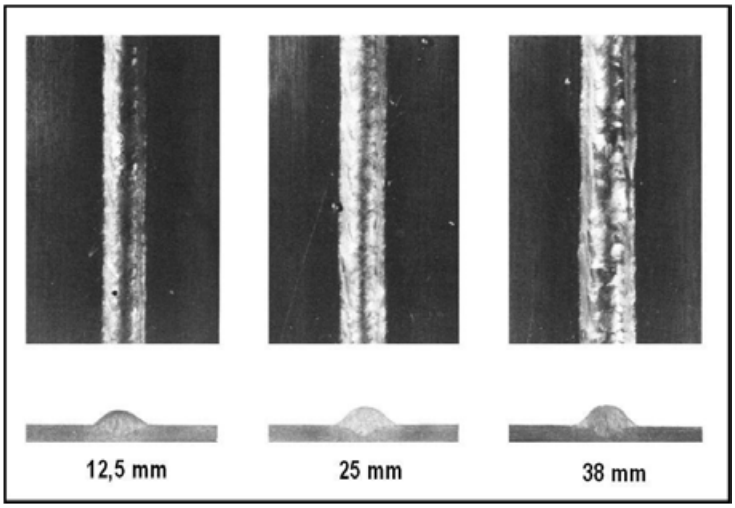


Figura 34 - Efeito da extensão do eletrodo nas características do cordão de solda

Esta seção apresentou os diversos efeitos dos vários parâmetros e técnicas de soldagem. Como um sumário, a Tabela XV esboça esses parâmetros e as modificações necessárias para alterar uma variedade de características da solda.

MANIPULAÇÕES DA TOCHA

Nenhuma discussão sobre técnicas de soldagem seria completa sem alguma referência aos métodos de manipulação da tocha. As recomendações que se seguem servem apenas como um guia a ser utilizado durante o treinamento de soldadores. À medida que os soldadores individualmente se tornarem mais proficientes no processo MIG/MAG, desenvolverão suas próprias técnicas para melhor adequar suas habilidades manuais ao trabalho.

Variáveis de soldagem para modificar	**Modificações desejadas**							
	Penetração		**Taxa de deposição**		**Área de seção reta do cordão**		**Largura do cordão**	
	▲	▼	▲	▼	▲	▼	▲	▼
Corrente e vel. alim. arame	▲	▼	▲	▼	▲	▼	+	+
Tensão	+	+	*	*	*	*	▲	▼
Velocidade de soldagem	+	+	*	*	▼	▲	▼	▲
Extensão do eletrodo	▼	▲	▲	▼	▲	▼	▲	▼
Diâmetro do arame	▼	▲	▼	▲	*	*	+	+
Gás de proteção %CO_2	▲	▼	*	*	*	*	*	*
Ângulo da tocha	puxando a 25º	empurrando	*	*	*	*	puxando	empurrando

* sem efeito + pequeno efeito ▲ aumento ▼ diminuição

Tabela XV - Ajustes nos parâmetros e nas técnicas de soldagem

Posição plana

São mostrados na Figura 35 alguns modelos recomendados de oscilação e posicionamento da tocha e seqüência de passes. Em uma junta de topo monopasse, emprega-se um ligeiro movimento de ida e volta. Passes de raiz com abertura são executados com uma pequena oscilação (trançado). Para passes de enchimento e acabamento usa-se a mesma oscilação com um ajuste para a largura desejada, tomando-se cuidado nas paredes do chanfro, pausando para obter um enchimento adequado nessas áreas.

Posição horizontal

São mostrados na Figura 36 padrões de oscilação, posicionamentos da tocha e seqüências de passes. Para juntas em ângulo é recomendado um movimento circular. Para passes de raiz e de enchimento em juntas de topo é empregado um movimento de vai-e-vem alinhado com os ajustes na largura do cordão conforme a necessidade. É usual fazer uma ligeira pausa na ligação com o passe anterior.

Posição vertical

São mostrados na Figura 37 padrões de oscilação e posicionamento da tocha na posição vertical considerando as progressões ascendente e descendente. Na progressão ascendente para uma junta de topo com chanfro reto é aplicada uma oscilação em vai-e-vem alinhado. Numa junta multipasse biselada é empregado um modelo de oscilação em "U" no passe de raiz. Os passes de enchimento e acabamento são feitos com uma oscilação para os lados com um ligeiro retorno nas laterais. O comprimento do retorno depende do diâmetro do arame. Na soldagem de uma junta em ângulo na progressão ascendente é aplicado um padrão do tipo "árvore de Natal" com pausa nas laterais.

Na progressão descendente é empregado um padrão em "U" invertido, pausando nas laterais nos passes de raiz, enchimento e acabamento. Deve-se sempre tomar cuidado para manter o arco na borda da poça de fusão. Evitando-se que o metal de solda fundido corra à frente da poça de fusão melhora-se a integridade da solda.

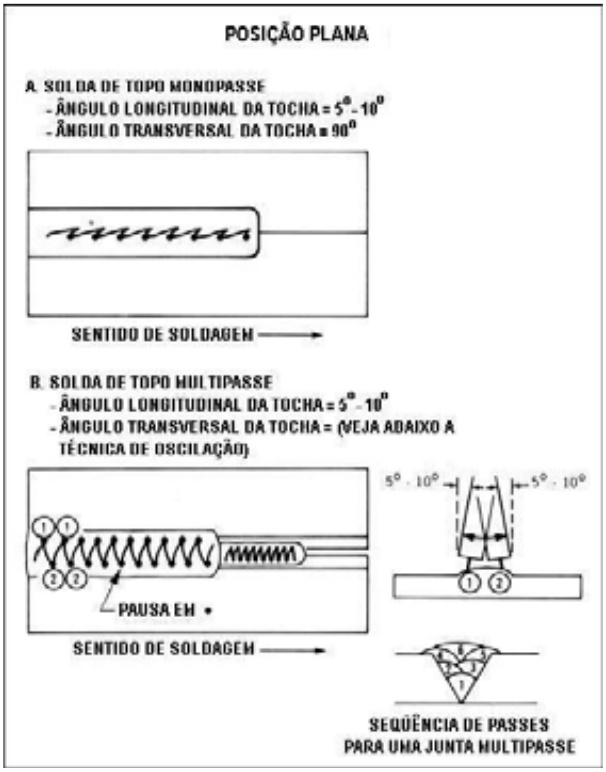

POSIÇÃO PLANA
A. SOLDA DE TOPO MONOPASSE
- ÂNGULO LONGITUDINAL DA TOCHA = 5° - 10°
- ÂNGULO TRANSVERSAL DA TOCHA = 90°
SENTIDO DE SOLDAGEM
B. SOLDA DE TOPO MULTIPASSE
- ÂNGULO LONGITUDINAL DA TOCHA = 5° - 10°
- ÂNGULO TRANSVERSAL DA TOCHA = (VEJA ABAIXO A TÉCNICA DE OSCILAÇÃO)
5° - 10°
5° - 10°
PAUSA EM •
SENTIDO DE SOLDAGEM
SEQÜÊNCIA DE PASSES
PARA UMA JUNTA MULTIPASSE

Figura 35 - Manipulações da tocha na posição plana

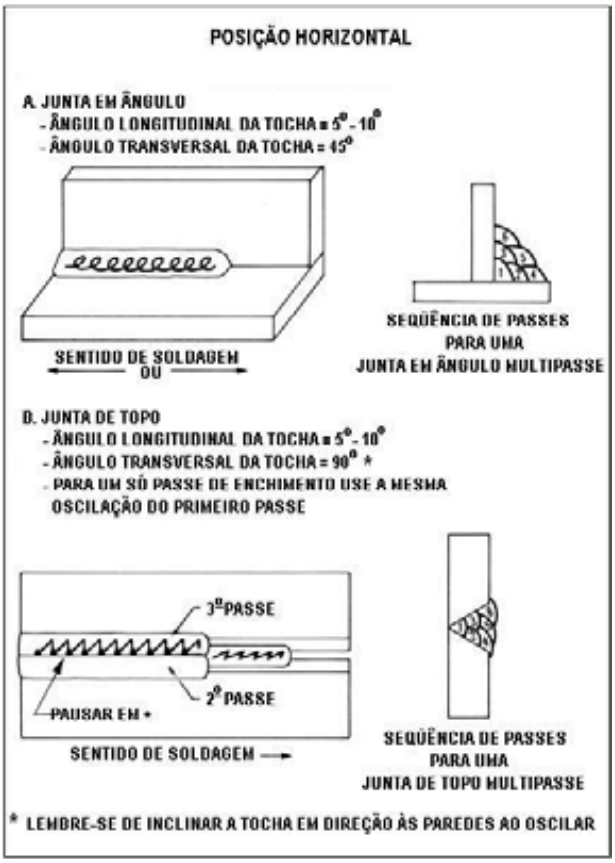

POSIÇÃO HORIZONTAL
A. JUNTA EM ÂNGULO
- ÂNGULO LONGITUDINAL DA TOCHA = 5° - 10°
- ÂNGULO TRANSVERSAL DA TOCHA = 45°
SENTIDO DE SOLDAGEM
OU
SEQÜÊNCIA DE PASSES
PARA UMA
JUNTA EM ÂNGULO MULTIPASSE
B. JUNTA DE TOPO
- ÂNGULO LONGITUDINAL DA TOCHA = 5° - 10°
- ÂNGULO TRANSVERSAL DA TOCHA = 90° *
- PARA UM SÓ PASSE DE ENCHIMENTO USE A MESMA
OSCILAÇÃO DO PRIMEIRO PASSE
3° PASSE
2° PASSE
PAUSAR EM •
SENTIDO DE SOLDAGEM
SEQÜÊNCIA DE PASSES
PARA UMA
JUNTA DE TOPO MULTIPASSE
* LEMBRE-SE DE INCLINAR A TOCHA EM DIREÇÃO ÀS PAREDES AO OSCILAR

Figura 36 - Manipulações de tocha na posição horizontal

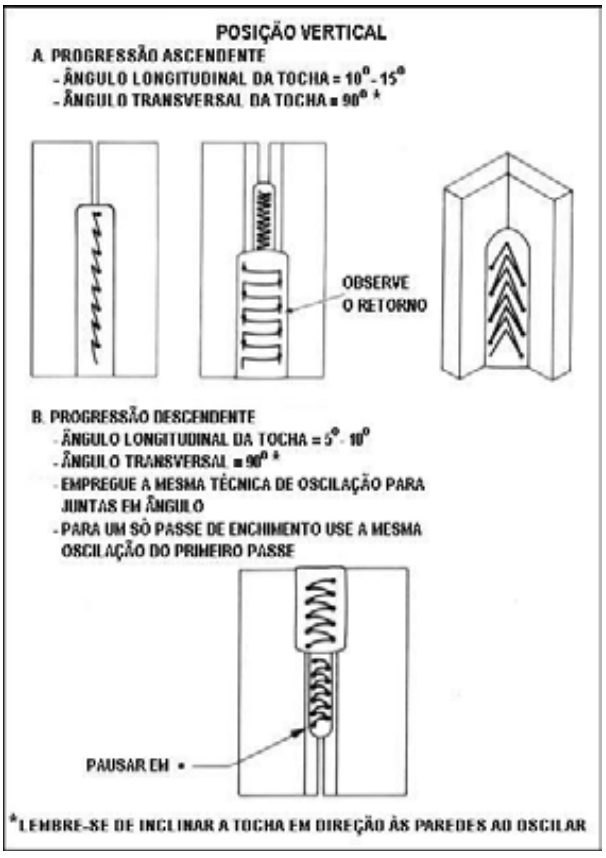

POSIÇÃO VERTICAL
A. PROGRESSÃO ASCENDENTE
- ÂNGULO LONGITUDINAL DA TOCHA = 10° - 15°
- ÂNGULO TRANSVERSAL DA TOCHA = 90° *
OBSERVE
O RETORNO
B. PROGRESSÃO DESCENDENTE
- ÂNGULO LONGITUDINAL DA TOCHA = 5° - 10°
- ÂNGULO TRANSVERSAL = 90° *
- EMPREGUE A MESMA TÉCNICA DE OSCILAÇÃO PARA
JUNTAS EM ÂNGULO
- PARA UM SÓ PASSE DE ENCHIMENTO USE A MESMA
OSCILAÇÃO DO PRIMEIRO PASSE
PAUSAR EM •
*LEMBRE-SE DE INCLINAR A TOCHA EM DIREÇÃO ÀS PAREDES AO OSCILAR

Figura 37 - Manipulações da tocha na posição vertical

Posição sobrecabeça

São mostrados na Figura 38 padrões de oscilação e posicionamento da tocha para a posição sobrecabeça. Aplicar uma oscilação em zigue-zague com pausas nas laterais do chanfro. Isso se aplica aos passes de raiz, enchimento e acabamento.

POSIÇÃO SOBRECABEÇA
- ÂNGULO LONGITUDINAL DA TOCHA = 5° - 10°
- ÂNGULO TRANSVERSAL DA TOCHA = 90° *
PAUSAR EM •
- EMPREGUE A MESMA TÉCNICA DE OSCILAÇÃO PARA JUNTAS EM ÂNGULO
- PARA UM SÓ PASSE DE ENCHIMENTO USE A MESMA OSCILAÇÃO DO PRIMEIRO PASSE
*LEMBRE-SE DE INCLINAR A TOCHA EM DIREÇÃO ÀS PAREDES AO OSCILAR

Figura 38 - Manipulações da tocha na posição sobrecabeça

Capítulo 8

CONDIÇÕES DE SOLDAGEM

Este capítulo cobre especificamente a soldagem real de aços de baixo carbono, aços inoxidáveis, ligas de alumínio e ligas de cobre. É o objetivo deste capítulo estabelecer procedimentos e condições gerais de soldagem recomendados para cada material.

As tabelas de condições de soldagem devem servir apenas como um ponto de partida quando se iniciarem novas aplicações. Elas não representam o único bom caminho pelo qual as soldas podem ser feitas. Modificações nas condições de soldagem serão provavelmente causadas pelas diferentes experiências dos soldadores, pela configuração exata da junta de solda e pelo equipamento em uso. Para obter as condições ótimas de soldagem que melhor satisfazem aos requisitos particulares de uma nova aplicação é sempre aconselhável conduzir os testes de qualificação antes do início da produção. Entretanto, esse é o ponto básico — escolher uma boa e estável condição de soldagem, e então ela provavelmente poderá ser empregada em muitas aplicações.

Quando as modificações nas condições de soldagem forem necessárias, devem ser feitas cautelosamente. Como foi visto no capítulo anterior, cada parâmetro de soldagem tem seus efeitos específicos nas características do cordão de solda e muitos desses efeitos são interdependentes. Todos os ajustes devem ser feitos um de cada vez e registrados para referências futuras.

A discussão que se segue a essas tabelas enfatizará os tópicos pertinentes e estabelecerá regras gerais que devem seguidas independentemente do procedimento de soldagem escolhido. Cada tabela lista todas as condições necessárias para executar uma solda, baseada na espessura do material, no projeto da junta e na posição de soldagem. Com respeito a essas tabelas, existem vários pontos importantes:

- a tensão listada é a tensão do arco, e não a tensão medida no voltímetro do equipamento de solda. A tensão do arco é lida entre o último ponto de contato elétrico na tocha (normalmente o bocal) e a peça. A tensão mostrada no voltímetro do equipamento de soldagem é geralmente 1,5 V a 2,5 V maior dependendo do diâmetro e do comprimento do cabo de solda;
- a profundidade da garganta do cordão de solda deve se igualar à espessura do material no caso de juntas em ângulo;
- os tipos de junta descritos não são os únicos que podem ser usados para uma dada espessura de material;
- as tabelas baseiam-se numa extensão do eletrodo de 10 mm na soldagem por curto-circuito e 20 mm na soldagem por aerossol;
- as condições de soldagem vertical são aplicáveis à progressão vertical ascendente, exceto onde for descrito de outra maneira;
- as condições de soldagem foram desenvolvidas empregando-se gases de proteção específicos. Se os gases em uso forem diferentes, serão necessários pequenos ajustes nessas condições.

Adicionalmente às condições de soldagem, um gráfico de taxa de queima para cada arame é apresentado. Com esses gráficos a velocidade de alimentação do arame pode ser aproximada para qualquer valor de corrente.

Garantia da qualidade na solda

Independentemente do material a ser soldado existem algumas poucas precauções que devem ser tomadas para evitar defeitos de porosidade e falta de fusão na solda:

- o material a ser soldado deve estar tão limpo quanto possível. Toda a graxa, óleo e lubrificantes devem ser removidos. Para se obter soldas de melhor qualidade a carepa, a ferrugem e outras camadas de óxidos devem ser mecânica ou quimicamente removidas. Essa atividade de limpeza é extremamente importante na soldagem do alumínio;
- na soldagem de chapas de aço carbono use apenas as combinações arame-gás de proteção recomendadas para os diversos tipos de aço: acalmados, semi-acalmados ou efervescentes. Veja o Capítulo 5 para as combinações recomendadas;
- evite, de um modo geral, as condições de soldagem que resultarem numa solidificação muito rápida do cordão de solda, tais como velocidades de soldagem muito altas. Os gases que se desprenderiam normalmente do metal de solda durante um resfriamento mais lento podem ficar aprisionados e gerar porosidade;
- mantenha um fluxo adequado de gás de proteção (como mostrado nas tabelas de condições de soldagem) e proteja o local de soldagem de ventos e de correntes de ar;
- mantenha o arame de solda centralizado em relação ao fluxo de gás de proteção. A curvatura do arame é normalmente responsável pelo fato de o arame de solda estar fora de centro. Esse desalinhamento pode ser corrigido usando-se um dispositivo de endireitamento do arame de solda colocado no alimentador de arame;
- ao soldar por ambos os lados duma chapa, ou onde não houve penetração total do primeiro passe no material de base, certifique-se que o segundo passe penetrará profundamente no primeiro. Quando o primeiro passe tiver penetrado completamente, ou quando for empregada uma abertura na raiz, é prática comum esmerilhar o outro lado para limpar o metal de solda antes que seja aplicado o segundo passe. Essa prática é obrigatória na soldagem do alumínio e do cobre, e quando são necessárias soldas de qualidade radiográfica em aços carbono e inoxidáveis;
- evite condições de soldagem nas quais o metal de solda fundido passe à frente da poça de fusão. Essa é a principal causa de defeitos de falta de fusão, particularmente na posição vertical com progressão descendente;

- na soldagem multipasse, esmerilhe todos os cordões de solda que apresentarem convexidade excessiva e molhabilidade ruim para deixá-los com uma superfície mais plana;
- remova os resíduos de óxidos ou de escória encontrados no cordão de solda com uma lixa ou com uma picadeira se for depositar outro cordão de solda posteriormente.

Projetos de junta

Independentemente do material a ser soldado, existem algumas poucas práticas gerais que devem ser consideradas no projeto de juntas de solda.

Chapas de espessura até 4,8 mm podem ser soldadas de topo com chanfro reto utilizando a transferência por curto-circuito ou por aerossol com baixa corrente (alumínio) se for mantida uma abertura de raiz até 0,8 mm. Chapas de espessura 4,8 mm e 6,5 mm podem ser soldadas em juntas de topo com chanfro reto por meio de transferência por aerossol quando for empregada uma abertura de raiz de 0,8 - 2,4 mm. Em todos os casos, pode ser aplicado um único passe se for empregada uma chapa como cobre-juntas. Na soldagem na posição sobrecabeça é prática usual usar cobre-juntas em juntas de topo. Entretanto, se não for utilizado cobre-juntas na soldagem de chapas de espessura 3,2 mm e acima, dois passes serão normalmente necessários — um de cada lado. É desejável uma sobreposição maior que a abertura original da raiz para evitar porosidade na linha de centro e falta de fusão. Consegue-se máxima sobreposição se for empregada no segundo passe a técnica de soldagem puxando.

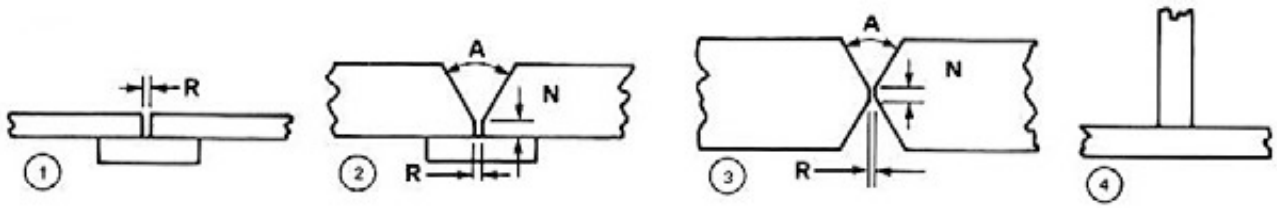
Chapas de espessura 6,5 mm e acima necessitam normalmente de chanfros em "V" simples ou duplo com ângulos de 45° até 70° — dependendo do material de base e da espessura — para produzir soldas de boa qualidade. Utiliza-se um nariz até 1,6 mm e uma abertura de raiz até 0,8 mm. Em chanfros em "V" simples, onde não for empregado um cobre-juntas, será normalmente necessário um passe de selagem depositado no lado oposto.

Recomendações específicas

Aços de baixo carbono

A transferência por curto-circuito deve ser utilizada na soldagem de materiais de pequena espessura na posição plana, no fechamento de aberturas largas e em toda a soldagem fora de posição. Ambos os gases CO_2 e misturas Ar / CO_2 podem ser empregados. As condições da Tabela XVI foram desenvolvidas utilizando uma mistura Ar / 25% CO_2. Do ponto de vista da estabilidade do arco, geometria do cordão de solda, redução de respingos e das propriedades mecânicas da solda, essa mistura proporciona os melhores resultados na soldagem por curto-circuito em geral.

Na transferência por aerossol podem ser empregadas misturas Ar-O_2 e Ar-CO_2. Pelos mesmos motivos relatados acima, a melhor mistura para esse tipo de transferência é a Ar / 5% O_2, já que o CO_2 não produzirá uma transferência em aerossol. A mistura Ar / 5% O_2 foi utilizada para desenvolver as condições encontradas na Tabela XVII. A transferência por aerossol deve ser aplicada na soldagem em posição plana de chapas de maior espessura. Quando forem empregadas correntes baixas, as soldas na posição vertical podem ser realizadas na progressão descendente.



ESP. CHAPA		POSIÇÃO DE SOLDAGEM	PROJETO DE JUNTA	(R) ABERTURA DE RAIZ		(N) NARIZ		ARAME Ø		VEL. DE ALIMENTAÇÃO DE ARAME		(4) TENSÃO (V)	CORRENTE (CC+)	VEL. DE SOLDAGEM		Nº DE PASSES
pol.	mm			pol.	mm	pol.	mm	pol.	mm	pol/min	mm/sec			pol./min	mm/sec	
.025	.64	F,H,V[3],O	1 & 4	0				.030	(.76)	110-120	47-51	13-14	45-50	20-25	8-11	1
.037	.94	F,H,V[3],O	1 & 4	0				.030	(.76)	125-135	53-57	13-14	55-60	20-25	8-11	1
		F,H,V[3],O	1 & 4	0				.035	(.89)	110-120	47-51	15-16	70-75	30-35	13-15	1
		F	1	1/32	(.79)			.035	(.89)	180-190	76-80	16-17	110-115	25-30	11-13	1
		H	1	1/32	(.79)			.035	(.89)	170-180	72-76	16-17	105-110	25-30	11-13	1
.0625	1.6		4					.035	(.89)	180-190	76-80	16-17	110-115	23-28	10-12	1
		V[3],O	1	1/32	(.79)			.035	(.89)	140-150	59-63	15-16	85-90	13-18	5-8	1
			4					.035	(.89)	145-155	61-66	15-16	90-95	23-28	10-12	1
		F	1	1/32	(.79)			.035	(.89)	265-275	112-116	18-20	150-155	14-19	6-8	1
			1	1/32	(.79)			.045	(1.1)	150-160	63-68	18-19	160-165	15-20	6-8	1
		H	1	1/32	(.79)			.035	(.89)	220-230	93-97	17-18	130-135	13-18	5-8	1
.125	3.2		4					.035	(.89)	270-280	114-118	18-20	155-160	23-28	10-12	1
			4					.045	(1.1)	175-185	74-78	18-20	175-185	25-30	11-13	1
		V[3],O	1	1/32	(.79)			.035	(.89)	220-230	93-97	17-18	130-135	13-18	5-8	1
			4					.035	(.89)	220-230	93-97	17-19	130-135	18-23	8-10	1
		F	1	3/16	(4.8)			.045	(1.1)	220-230	93-97	19-20	210-215	15-20	6-10	1
			2	3/32	(2.4)	1/16	(1.6)	.045	(1.1)	220-230	93-97	19-20	210-215	13-18	5-10	1
		H	4					.045	(1.1)	210-225	89-95	19-21	210-215	15-20	6-8	1
1875	4.8		1	3/16	(4.8)			.045	(1.1)	180-190	76-80	18-20	175-185	12-17	5-7	2
			2	3/32	(2.4)	1/16	(1.6)	.045	(1.1)	180-190	76-80	18-20	175-185	15-20	6-8	1
		V[3],O	2	3/32	(2.4)	1/16	(1.6)	.035	(.89)	200-210	85-89	17-18	120-125	10-15	4-6	2
			4					.035	(.89)	240-250	102-106	17-19	140-145	13-18	5-8	1
		F	2	3/32	(2.4)	1/16	(1.6)	.045	(1.1)	235-245	99-104	20-21	220-225	12-17	5-7	2
		H	2	3/32	(2.4)	1/16	(1.6)	.045	(1.1)	180-190	76-80	18-20	175-185	8-13	3-5	2
.250	6.4		4					.045	(1.1)	235-245	99-104	20-21	220-225	8-13	3-5	1
		V,O	2	3/32	(2.4)	1/16	(1.6)	.035	(.89)	200-210	85-89	17-18	120-125	6-8	2-3	2
			4					.035	(.89)	240-250	102-106	18-19	140-145	11-16	5-7	2
		V	4					.035	(.89)	220-230	93-97	17-19	130-135	4-6	2-3	1
		H	2	3/32	(2.4)	1/16	(1.6)	.045	(1.1)	180-190	76-80	18-20	175-185	12-17	5-7	4
			4					.045	(1.1)	235-245	99-104	20-21	220-225	8-13	3-5	2
.375	9.5	V	2	3/32	(2.4)	1/16	(1.6)	.035	(.89)	270-280	114-118	19-20	150-155	13-18	5-8	2
														5-7	2-3	1
			4					.035	(.89)	270-280	114-118	19-20	150-155	4-6	2-3	2
		O	4 & 2	3/32	(2.4)	1/16	(1.6)	.035	(.89)	290-300	123-127	19-21	165-175	9-14	4-6	3
		H	3	3/32	(2.4)	1/16	(1.6)	.045	(1.1)	180-190	76-80	18-20	175-185	8-13	3-5	4
			4					.045	(1.1)	235-245	99-104	20-21	220-225	11-16	5-7	4
.500	12.7	V	3	3/32	(2.4)	1/16	(1.6)	.035	(.89)	270-280	114-118	19-20	150-155	8-10	3-4	4
			4					.035	(.89)	270-280	114-118	19-20	150-155	11-16	5-7	2
														4-6	2-3	2
		O	4 & 2	3/32	(2.4)	1/16	(1.6)	.035	(.89)	290-300	123-127	19-21	165-175	8-13	3-5	5

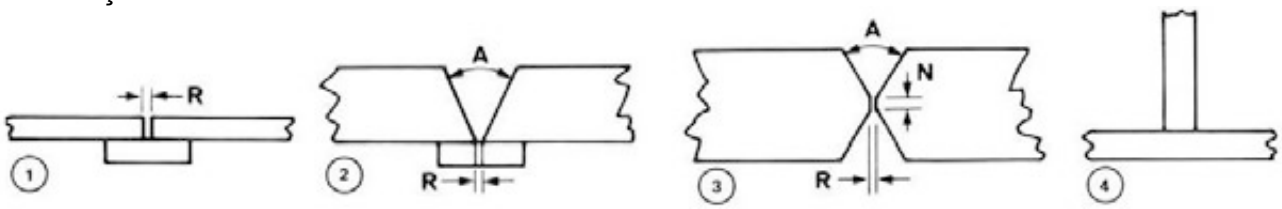
Tabela XVI - Condições de soldagem para aços de baixo carbono, transferência por curto-circuito, arame ER70S-3

Notas da Tabela XVI:
Nota 1: ângulo dependente do acesso da tocha à raiz.
Nota 2: para juntas sobrepostas, aumentar a velocidade em 10%.
Nota 3: progressão vertical descendente.
Nota 4: tensão do arco medida entre as roldanas e a peça.
Nota 5: as condições acima são também aplicáveis à soldagem de aços inoxidáveis com a possibilidade de altas tensões graças ao gás A1025 (base de He) à menor fluidez do metal de solda.
Nota 6: vazão do gás de proteção: 16 - 19 L/min.
Nota 7: A = 45° - 60°.

Ambas as técnicas de soldagem puxando ou empurrando podem ser empregadas alternadamente sem a necessidade de reajuste nas condições de soldagem. Geralmente a técnica de soldagem empurrando proporciona melhor visibilidade da junta de solda e uma poça de fusão mais plana. A técnica de soldagem puxando proporciona melhor penetração e é algumas vezes considerada mais fácil pelo soldador pouco experiente.

Adicionalmente, podem ser utilizadas as progressões ascendente e descendente, porém não alternadamente. As velocidades de soldagem associadas com a progressão descendente são muito maiores que a progressão ascendente. A progressão descendente é normalmente a preferida para a soldagem de peças de pequena espessura (até 6,5 mm), onde a velocidade de soldagem é importante, e para passes de raiz na soldagem multipasse. A progressão ascendente é recomendada para a soldagem de materiais de maior espessura — onde a qualidade e a resistência são necessárias — por causa da menor tendência à *colagem*.

A Figura 39 mostra as características de queima para vários diâmetros de arames de solda de aço carbono, e a Figura 40 mostra as taxas de deposição para essas velocidades de alimentação de arame.



ESP. CHAPA		PROJETO DE JUNTA	(R) ABERTURA DE RAIZ		(N) NARIZ		ARAME Ø		VEL. DE ALIMENTAÇÃO DE ARAME		(3) TENSÃO (V)	CORRENTE (CC+) (A)	VEL. DE SOLDAGEM		Nº DE PASSES
pol.	mm		pol.	mm	pol.	mm	pol.	mm	pol/min	mm/sec			pol./min	mm/sec	
.125	3.2	1	1/16	(1.6)			.035	(.89)	350-375	148-159	26-27	190-200	20-25	8-11	1
		4					.035	(.89)	375-400	159-169	26-27	200-210	30-35	13-15	1
		1	3/16	(4.8)			1/16	(1.6)	185-195	78-82	26-27	310-320	8-13	3-5	1
		2	3/32	(2.4)			1/16	(1.6)	170-180	72-76	25-26	290-300	12-17	5-7	2
.250	6.4	2	3/32	(2.4)			.045	(1.1)	400-425	169-180	29-31	320-330	17-22	7-9	2
		4					1/16	(1.6)	235-245	99-104	27-28	360-370	15-20	6-8	1
		4					.045	(1.1)	425-450	180-190	30-32	330-340	14-19	6-8	1
		2	3/32	(2.4)			1/16	(1.6)	215-225	91-95	26-27	340-350	11-16	5-7	2
		3	1/16	(1.6)	3/32	(2.4)	.045	(1.1)	365-385	154-163	29-30	300-310	11-16	5-7	2
.375	9.5	3	1/16	(1.6)	3/32	(2.4)	1/16	(1.6)	170-180	72-76	25-26	290-300	10-15	4-6	2
		4					1/16	(1.6)	205-215	87-91	26-27	300-340	10-15	4-6	2
		2					1/16	(1.6)	195-210	82-89	26-27	320-330	17-22	7-9	4
.500	12.7	3	1/16	(1.6)	3/32	(2.4)	1/16	(1.6)	185-195	78-82	26-27	310-320	17-22	7-9	4
		4					1/16	(1.6)	235-245	99-104	27-28	360-370	15-20	6-8	3
.625	15.9	3	1/16	(1.6)	3/32	(2.4)	1/16	(1.6)	195-210	82-89	26-27	320-330	13-18	5-8	4
		4					1/16	(1.6)	215-225	91-95	27-28	340-350	13-18	5-8	4
.750	19.1	3	1/16	(1.6)	3/32	(2.4)	1/16	(1.6)	195-210	82-89	26-27	320-330	11-16	5-7	4
		4					1/16	(1.6)	235-245	99-104	27-28	360-370	10-15	4-6	6

Tabela XVII - Condições de soldagem para aços de baixo carbono, transferência por aerossol, arame ER70S-3

Notas da Tabela XVII:
Nota 1: ângulo dependente do acesso da tocha à raiz.
Nota 2: para juntas sobrepostas, aumentar a velocidade em 10%.
Nota 3: tensão do arco medida entre as roldanas e a peça.
Nota 4: as condições acima são também aplicáveis à soldagem de aços inoxidáveis com uma mistura Ar / 1% O2 como gás de proteção.
Nota 5: vazão do gás de proteção: 19 - 24 L/min.
Nota 6: A = 45° - 60°.

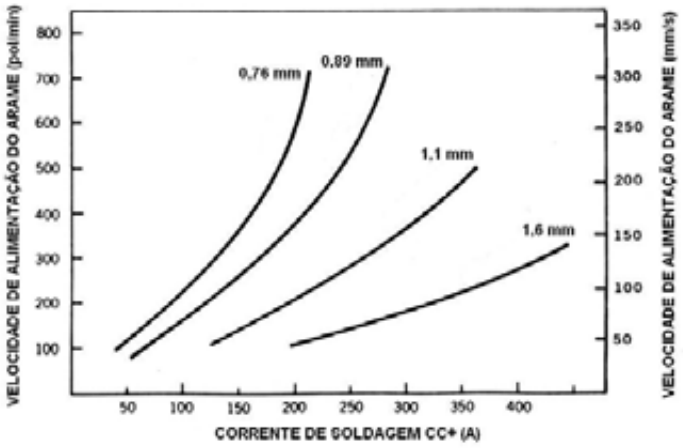


Figura 39 - Características de queima - arames de aço de baixo carbono

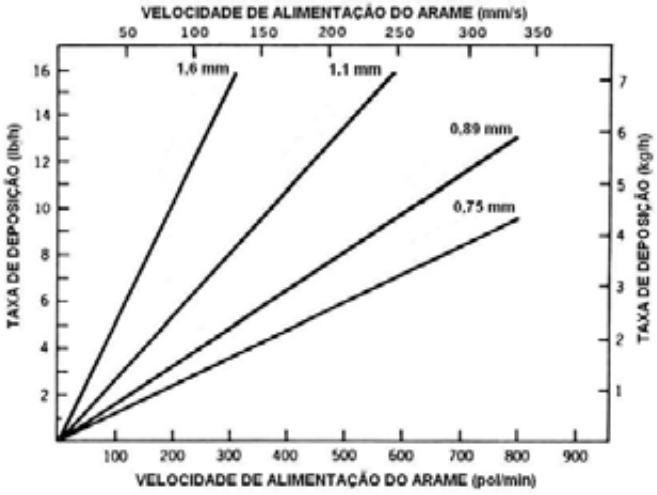


Figura 40 - Taxas de deposição - arames de aço de baixo carbono

Aços inoxidáveis

A transferência por curto-circuito deve ser utilizada na soldagem de materiais de pequena espessura na posição plana, no fechamento de aberturas largas e em toda a soldagem fora de posição. O melhor gás de proteção para se usar na soldagem por curto-circuito de aços inoxidáveis é 90% He / 7,5% Ar / 2,5% O_2. Essa mistura proporciona boa penetração, boa estabilidade do arco e boas propriedades da solda — particularmente a resistência à corrosão — em soldas monopasse ou multipasse. A mistura Ar / 25% CO_2 pode ser usada, mas apenas para soldas monopasse onde a resistência à corrosão não seja essencial ao uso final. O dióxido de carbono jamais deve ser utilizado.

A transferência por aerossol deve ser empregada na posição plana na soldagem monopasse ou multipasse de materiais com maiores espessuras. Nesse modo de transferência a mistura Ar / 1% O_2 assegura os melhores resultados, particularmente do ponto de vista da aparência do cordão. Se, para uma determinada aplicação, a molhabilidade do cordão de solda ficar prejudicada, a mistura Ar / 2% O_2 poderá ajudar. Entretanto, o aumento do óxido de cromo causará uma leve descoloração do cordão de solda.

As considerações sobre as técnicas de soldagem aplicáveis aos aços de baixo carbono também são válidas para os aços inoxidáveis. No entanto, a técnica de soldagem empurrando é algumas vezes preferida, já que é possível depositar um cordão de solda mais plano, embora a superfície fique mais oxidada.

As condições de soldagem para os aços inoxidáveis são mostradas na Tabela XVIII, e a Figura 41 mostra as características de queima para diversos diâmetros de arames de solda de aço inoxidável, enquanto a Figura 42 exibe as taxas de deposição para essas velocidades de alimentação de arame.

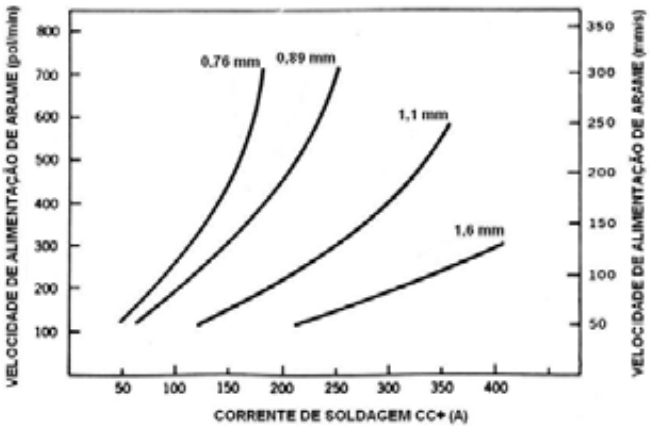


Figura 41 - Características de queima - arames de aço inoxidável tipo 300

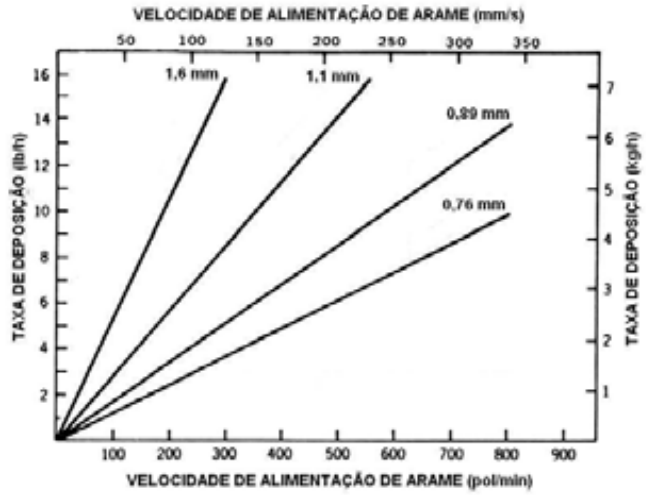


Figura 42 - Taxas de deposição - arames de solda de aço inoxidável tipo 300

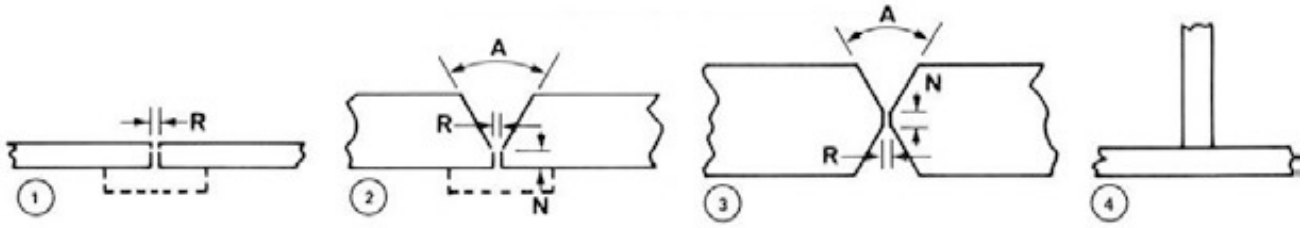
Espessura (mm)	Arame Ø (mm)	Corrente CC+ (A)	Tensão (V)	Velocidade alimentação arame (mm/s)	Vazão gás prot. (L/min)	Velocidade soldagem (mm/s)	Número passes
1,6	0,8	60-100	15-18	65-80	12-14	6-13	1
	0,9			40-80			
2,4	0,9	125-150	17-21	95-120	12-14	8-13	1
3,2	0,9	130-160	18-24	105-120	12-14	8-10	1
4,0	1,2	190-250	22-26	85-120	12-14	10-13	1
	1,2			110-155			
6,5	1,6	225-300	22-30	45-65	14-21	10-13	1
10,0	1,6	275-325	22-30	95-105	14-21	6-8	2
12,5	2,4	300-350	22-30	30-35	14-21	2	3-4
19,0	2,4	350-375	22-30	35-40	14-21	2	5-6
25,0	2,4	350-375	22-30	35-40	14-21	1	7-8

Tabela XVIII - Condições de soldagem para aços inoxidáveis, transferência por curto-circuito e aerossol

Nota — dados para a posição plana; reduza a corrente em 10-20% para outras posições. Deve ser empregada a transferência por curto-circuito nas posições vertical e sobrecabeça com arames de diâmetro 0,8 - 0,9 mm.
1. Para juntas de topo e em ângulo. A espessura da peça também indica o tamanho do cordão de solda da junta em ângulo.
2. Arames de alto teor de silício são mais fluidos, produzindo cordões mais achatados.
3. Seleção do gás de proteção: Ar / 1-5% O_2 – somente posições plana e horizontal em ângulo; Ar / 25% CO_2 – todas as posições, alguma absorção de carbono;
*He, Ar, CO_2 – para todas as posições de soldagem; CO_2 – onde puder ser tolerada a absorção de carbono.
* A vazão do gás de proteção deve ser aumentada em 50-100% para a mistura A1025. Para misturas de hélio, devem ser previstos aumentos na tensão de 6 V a 7 V.

Alumínio

O método mais comum e também o preferido para a soldagem do alumínio é o processo de transferência por aerossol, independentemente da espessura do material ou da posição de soldagem. A alta condutividade térmica do alumínio é tal que, mesmo com o alto aporte térmico desenvolvido na soldagem com transferência por aerossol, a taxa de solidificação da poça de fusão é alta o suficiente para permitir a soldagem fora de posição. O argônio puro é normalmente empregado como gás de proteção na soldagem semi-automática porque a poça de fusão fica facilmente controlável e a solda resultante exibe uma boa geometria de cordão e também boa integridade. Entretanto, se for desejada uma poça de fusão mais quente, por exemplo, para chapas grossas ou para soldagem automática, podem ser empregadas misturas argônio-hélio. Embora a transferência por curto-circuito possa ser aplicada na soldagem de chapas de alumínio extremamente finas, recomenda-se a transferência por aerossol sempre que for possível. Se não for tomado o devido cuidado na limpeza da superfície da solda, a alta velocidade de solidificação da poça de fusão produzida pela transferência por curto-circuito muito provavelmente causará porosidade. As condições de soldagem que aparecem na Tabela XIX foram desenvolvidas utilizando o argônio como gás de proteção e a transferência por aerossol.



ESPESSURA		POSIÇÃO	PROJETO DE JUNTA	ARAME Ø		CORRENTE CC+ (A)	(5) TENSÃO (V)	VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO DE ARAME		GÁS ARGÔNIO		NÚMERO DE PASSES
pol.	mm			pol.	mm			pol./min	mm/sec.	CFH	lph	
1/8	(3.2)	F,H,V,O[4]	1,4	.030	.76	130-140	19-21	18-22	8-9	35	991	2,1
			1,4	3/64	1.19	140-150	19-21	35-40	15-17	35	991	2,1
			1	3/64	1.19	180-190	22-24	21-26	9-11	40	1133	2
1/4	(6.4)	F	2	3/64	1.19	160-170	20-22	28-33	12-14	40	1133	3
			1	3/64	1.19	160-170	20-22	28-33	12-14	40	1133	2
		H	2	3/64	1.19	200-210	22-24	32-36	13-15	40	1133	3
			4	3/64	1.19	200-210	21-23	19-23	8-10	40	1133	1
			1	3/64	1.19	150-160	19-21	28-33	12-14	45	1274	2
		V & O[4]	2	3/64	1.19	200-210	22-24	32-36	14-15	45	1274	3
			4	3/64	1.19	200-210	21-23	19-23	8-10	45	1274	1
3/8	(9.6)	F	2	1/16	1.6	250-260	21-23	28-34	12-14	40	1133	3
			2	1/16	1.6	240-250	21-23	26-31	11-13	40	1133	4
		H	4	1/16	1.6	260-270	22-24	15-20	6-8	40	1133	1
		V & O[4]	2	1/16	1.6	220-230	21-23	24-28	10-12	45	1274	4
			4	1/16	1.6	220-230	21-23	24-28	10-12	45	1274	2
			2	1/16	1.6	250-260	22-24	25-29	11-12	40	1133	4
1/2	(12.8)	F	3	1/16	1.6	270-280	22-24	32-36	14-15	40	1133	4
			2	1/16	1.6	250-260	22-24	25-29	11-12	40	1133	4
			3	1/16	1.6	220-230	21-23	20-24	8-10	40	1133	6
		H	4	1/16	1.6	270-280	22-24	22-26	9-11	40	1133	3
			4	3/32	2.4	280-290	24-26	19-24	8-10	50	1416	2

			2	1/16	1.6	220-230	21-23	21-25	9-11	45	1274	4
		V & O[4]	3	1/16	1.6	220-230	21-23	21-25	9-11	45	1274	4
			4	1/16	1.6	240-250	21-23	18-22	8-9	45	1274	3
			3	1/16	1.6	270-280	22-24	28-33	12-14	40	1133	6
5/8	(16.0)	F	3	3/32	2.4	210-320	25-27	25-30	11-13	45	1274	4
			4	1/16	1.6	270/280	22-24	13-17	5-7	40	1133	3
		H	4	3/32	2.4	310-320	26-28	17-21	7-9	45	1274	3
			3	1/16	1.6	250-260	22-24	30-34	13-14	40	1133	8
			2	1/16	1.6	230-240	22-24	21-25	9-11	45	1274	6
		V & O[4]	3	1/16	1.6	230-240	22-24	21-25	9-11	45	1274	6
			4	1/16	1.6	250-260	22-24	21-25	9-11	45	1274	6
3/4	(19.2)	F	3	3/32	2.4	310-320	26-28	15-19	6-8	40	1133	4
			3	1/16	1.6	260-270	22-24	23-27	10-11	45	1274	8
		H	4	3/32	2.4	350-360	28-30	15-19	6-8	40	1133	4
			2	1/16	1.6	230-240	22-24	21-25	9-11	45	1274	8
		V & O[4]	3	1/16	1.6	230-240	22-24	21-25	9-11	45	1274	8
			4	1/16	1.6	230-240	22-24	19-23	8-10	45	1274	6
1	(25.4)	F	3	3/32	2.4	310-320	26-28	15-19	6-8	40	1133	6
			3	3/32	2.4	280-300	24-26	23-27	10-11	45	1274	8
		H	4	3/32	2.4	350-360	28-30	15-19	6-8	40	1133	6
			2	1/16	1.6	230-240	22-24	21-25	9-11	45	1274	12
		V & O	3	1/16	1.6	230-240	22-24	21-25	9-11	45	1274	12
			4	1/16	1.6	250-260	22-24	19-23	8-10	45	1274	10

Tabela XIX - Condições de soldagem - alumínio, transferência por aerossol, arame de alumínio, argônio

Notas da Tabela XIX:
Nota 1 – junta de topo com chanfro reto sem abertura de raiz ou com cobrejuntas temporário.
Nota 2 – ângulo dependente do acesso da tocha à raiz. O ângulo aumenta com o aumento da espessura da peça.
Nota 3 – para juntas sobrepostas aumente a velocidade em 10%.
Nota 4 – não é recomendada a soldagem na posição sobrecabeça de juntas de topo sem cobre-juntas.
Nota 5 – tensão do arco medida entre o conduíte e a peça.
Nota 6 – junta 1: R = 0-1,6 mm
junta 2: R = 1,6 mm / N = 0,8 mm / A = 60°
junta 3: R = 0-0,8 mm / N = 1,6 mm / A = 70°
Posições: F = plana / H = horizontal / V = vertical / O = sobrecabeça.

A Figura 43 e a Figura 44 mostram as características de queima para diversos diâmetros de arames de alumínio 4043 e 5356, e a Figura 45 exibe as taxas de deposição e suas respectivas velocidades de alimentação de arame.

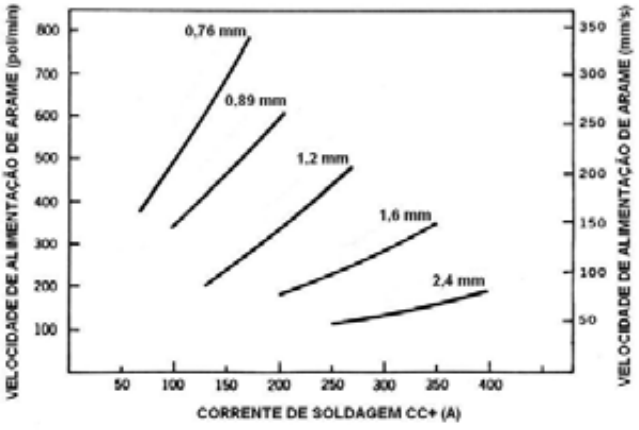


Figura 43 - Características de queima - arame de solda de alumínio 4043

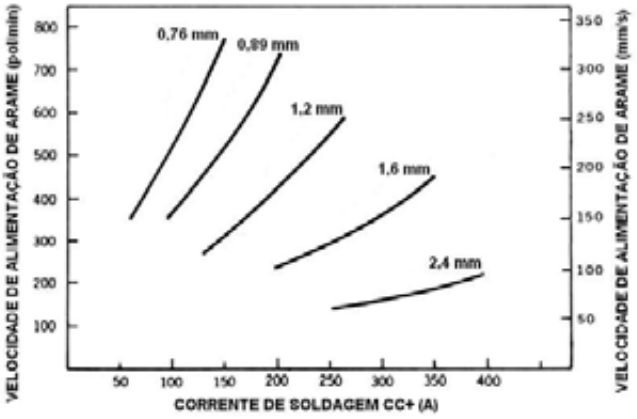


Figura 44 - Características de queima - arame de solda de alumínio 5356

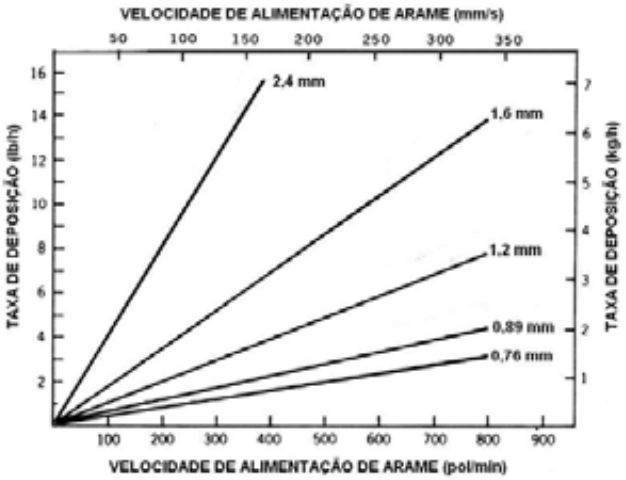


Figura 45 - Taxas de deposição - arames de alumínio

Diferentemente da soldagem de aços, apenas a técnica de soldagem empurrando e a progressão ascendente podem ser empregadas na soldagem do alumínio. Isso é necessário para proporcionar a "limpeza" da peça à frente da poça de fusão. A ação de limpeza está ilustrada na Figura 46. Nessa região, a película de óxido de alumínio no metal de base é quebrada pela ação do arco. Essa ação é necessária para se conseguir uma boa molhabilidade do metal de base e um depósito de solda íntegro. Se forem empregadas a técnica de soldagem puxando ou a progressão descendente, o cordão de solda poderá tornar-se poroso, descorado, e com uma molhabilidade pobre com o metal de base. É apresentada na Figura 47 uma comparação entre soldas feitas nas mesmas condições de soldagem, porém empregando as técnicas puxando e empurrando.

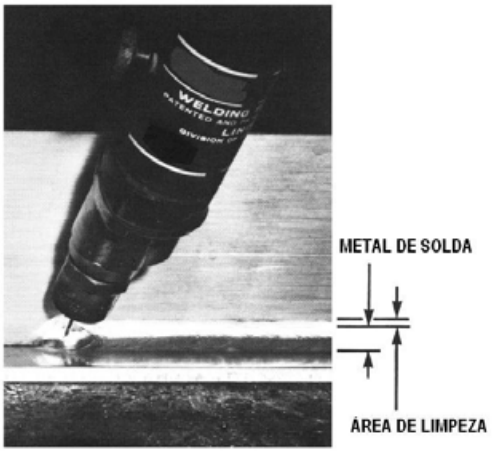
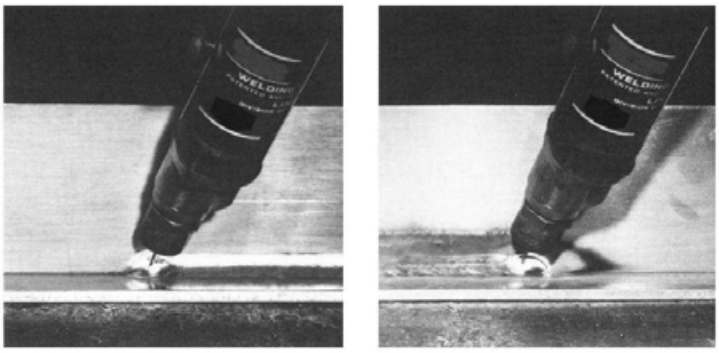


Figura 46 - Técnica de soldagem do alumínio



TÉCNICA DE SOLDAGEM EMPURRANDO

TÉCNICA DE SOLDAGEM PUXANDO

Figura 47 - Efeito da técnica de soldagem - alumínio

Os cordões de solda devem ser depositados com a técnica filetando ou com ligeira oscilação. Grandes oscilações devem ser evitadas, pois o cordão de solda pode tornar-se excessivamente oxidado.

Cobre

O cobre, como o alumínio, é também um material de alta condutividade térmica. Por isso, o modo de transferência por aerossol deve ser empregado para todas as posições de soldagem. Para ajudar a superar a inércia da poça de fusão de arames de cobre (E Cu), devem ser empregadas misturas hélio-argônio (He / 25% Ar) em materiais mais espessos. Embora o argônio puro proporcione melhor estabilidade ao arco, seu uso deve ficar restrito a materiais com espessura até 6,5 mm. Entretanto, o argônio pode ser utilizado nos seguintes materiais, já que o teor de liga melhora a fluidez da poça de fusão:

- ligas de cobre-níquel (arames E CuNi);
- bronze ao silício (arames E CuSi).

Outra prática utilizada para aumentar a fluidez da poça de fusão é pré-aquecer inicialmente a chapa antes da soldagem e manter uma alta temperatura entrepasses durante uma soldagem multipasses.

A técnica de soldagem empurrando deve ser aplicada para produzir um cordão de solda com boa geometria. Como o arco está à frente da poça de fusão, ocorrerá um pré-aquecimento da chapa, permitindo, portanto, uma melhor molhabilidade. A técnica de soldagem puxando produzirá um cordão de solda mais convexo e fortemente oxidado.

A progressão ascendente é também a técnica recomendada para a soldagem do cobre. O cordão de solda deve ser depositado filetando ou com pequena oscilação. Devem ser evitados cordões de solda com oscilações largas. A progressão descendente pode ser empregada em materiais de espessura até 6,5 mm, porém são muito comuns de ocorrer com essa técnica defeitos de falta de fusão.

Diferentemente dos outros materiais mencionados, a soldagem na posição sobrecabeça é extremamente difícil, embora possível. Quando se consegue essa proeza, a geometria e a molhabilidade do cordão são pobres. Esse tipo de soldagem deve ser evitado tanto quanto possível.

Condições representativas de soldagem para o cobre e suas ligas aparecem na Tabela XX. A Figura 48 e a Figura 49 mostram as características de queima para diversos diâmetros de arame de cobre e de bronze ao silício, e a Figura 50 e a Figura 51 mostram as taxas de deposição para as mesmas velocidades de alimentação de arame.

Material	Espessura Mínima	Junta	Arame (Ø) (mm)	Gás de Proteção	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (mm/s)	Número de passes
Cobre	até 5	chanfro reto	1,2	argônio	180-250	6-8	1-2
	6,5	ângulo 75º - 90º nariz 1,6 – 2,4 mm	1,6	HE-75	250-325	4-8	1-2
	10,0	ângulo 75º - 90º nariz 1,6 – 2,4 mm	1,6	HE-75	300-325	3-5	1-3
	12,5	ângulo 75º - 90º nariz 2,4 mm abertura 2,4-3,2 mm	1,6	HE-75	330-400	4-6	2-4
Bronze ao Silício	6,5	chanfro reto abertura 1,6 mm	1,6	argônio	300	6	1
	10,0	ângulo 60º nariz 1,6 mm	1,6	argônio	300	4	1
	12,5	ângulo 60º nariz 1,6 mm	1,6	argônio	315	3	3

Tabela XX - Condições de soldagem - cobre e bronze ao silício

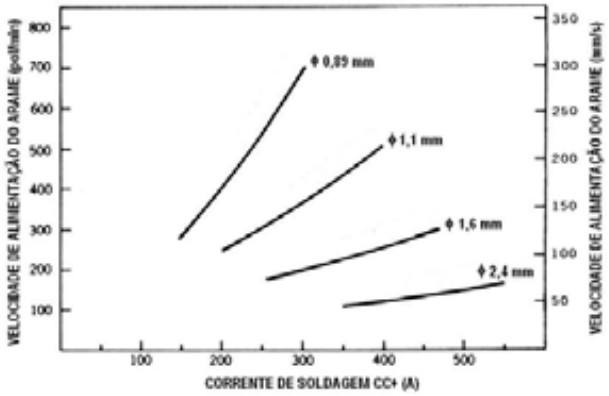

VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO DO ARAME (pol/min)
VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO DO ARAME (mm/s)
CORRENTE DE SOLDAGEM CC+ (A)
ϕ 0,89 mm
ϕ 1,1 mm
ϕ 1,6 mm
ϕ 2,4 mm

Figura 48 - Características de queima - arame de cobre desoxidado

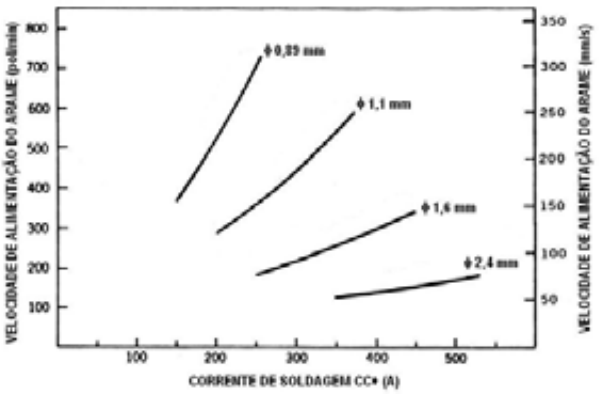

VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO DO ARAME (pol/min)
VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO DO ARAME (mm/s)
CORRENTE DE SOLDAGEM CC+ (A)
ϕ 0,89 mm
ϕ 1,1 mm
ϕ 1,6 mm
ϕ 2,4 mm

Figura 49 - Características de queima - arame de bronze ao silício

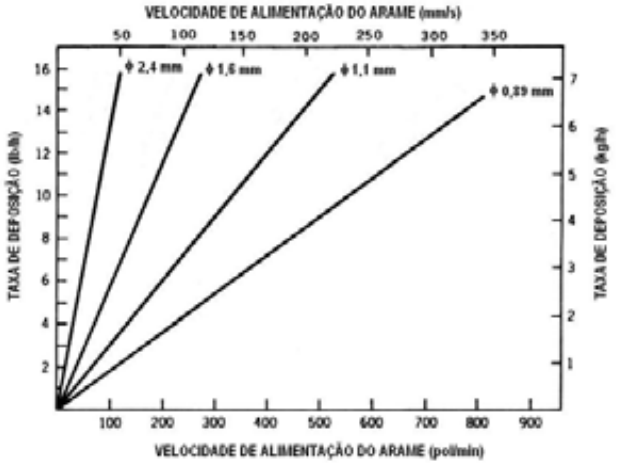

VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO DO ARAME (mm/s)
50 100 150 200 250 300 350
ϕ 2,4 mm
ϕ 1,6 mm
ϕ 1,1 mm
ϕ 0,89 mm
TAXA DE DEPOSIÇÃO (lb/h)
TAXA DE DEPOSIÇÃO (kg/h)
100 200 300 400 500 600 700 800 900
VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO DO ARAME (pol/min)

Figura 50 - Taxa de deposição - cobre desoxidado

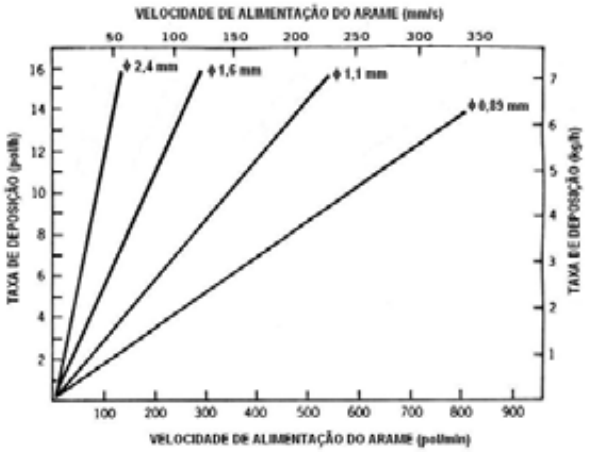

VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO DO ARAME (mm/s)
50 100 150 200 250 300 350
ϕ 2,4 mm
ϕ 1,6 mm
ϕ 1,1 mm
ϕ 0,89 mm
TAXA DE DEPOSIÇÃO (lb/h)
TAXA DE DEPOSIÇÃO (kg/h)
100 200 300 400 500 600 700 800 900
VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO DO ARAME (pol/min)

Figura 51 - Taxa de deposição - arame de bronze ao silício

Capítulo 9

DEFEITOS DE SOLDA
Suas causas e soluções

Com as condições e técnicas de soldagem corretas e com os materiais também corretos o processo MIG/MAG resultará num depósito de solda de alta qualidade. Entretanto, assim como em qualquer outro processo de soldagem, os defeitos de solda podem ocorrer. A maioria dos defeitos encontrados na soldagem é causada por práticas de soldagem inadequadas. Uma vez que as causas sejam determinadas, o operador pode facilmente corrigir o problema.

Defeitos usualmente encontrados incluem falta de penetração, falta de fusão, mordedura, porosidade e trincas longitudinais. Este capítulo trata das ações corretivas que devem ser tomadas.

Falta de penetração

Esse tipo de defeito é encontrado num dos três casos (veja a Figura 52):

- quando o cordão de solda não penetrar completamente na espessura do metal de base;
- quando dois cordões de solda opostos não se interpenetrarem;
- quando o cordão de solda não penetrar na garganta de uma junta em ângulo.

corrente de soldagem é o parâmetro que tem o maior efeito na penetração. A penetração incompleta é normalmente causada pela aplicação de uma corrente de soldagem muito baixa e pode ser evitada simplesmente aumentando essa corrente de soldagem. Outras causas podem ser o emprego de uma velocidade de soldagem muito baixa e um ângulo incorreto da tocha. Ambas permitirão que a poça de fusão passe à frente do arco, atuando como um amortecimento à penetração. O arco deve ser mantido na margem anterior da poça de fusão.

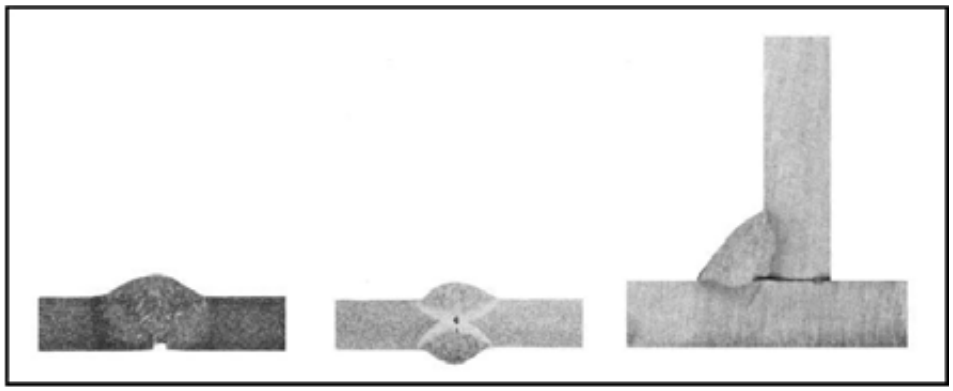


Figura 52 - Exemplos de falta de penetração

Falta de fusão

Falta de fusão ocorre onde não existir fusão entre o metal de solda e as superfícies do metal de base. Este defeito pode ser observado na Figura 53. A causa mais comum de falta de fusão é uma técnica de soldagem deficiente. Ou a poça de fusão fica muito larga (por causa de uma velocidade de soldagem muito baixa) e/ou o metal de solda passou à frente do arco. Mais uma vez, o arco deve ser mantido na margem anterior da poça de fusão. Quando isso é feito, a poça de fusão não ficará muito larga e não poderá "amortecer" o arco.

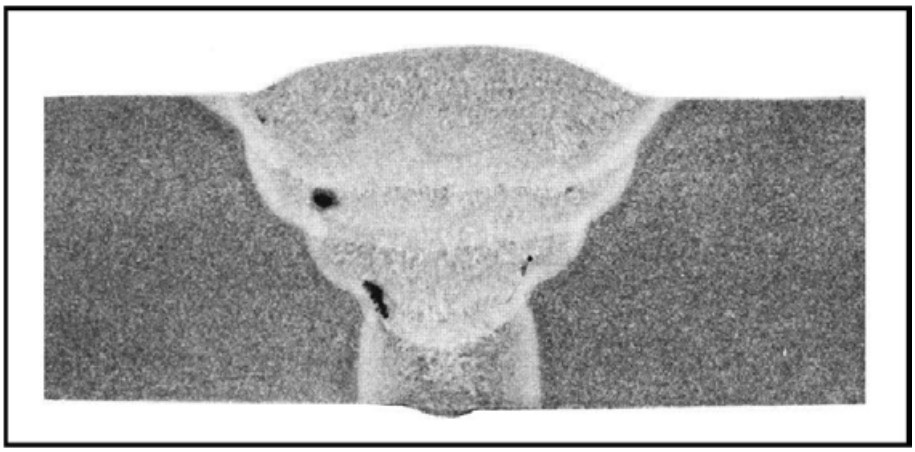


Figura 53 - Exemplo de falta de fusão

Outra causa é o uso de uma junta de solda muito larga. Se o arco for dirigido diretamente para o centro da junta, o metal de solda fundido apenas fluirá e fundir-se-á contra as paredes do chanfro sem, porém, fundi-las. O calor do arco deve ser usado também para fundir o metal de base, o que é alcançado tornando a junta mais estreita ou dirigindo o arco também para as paredes do chanfro. Na soldagem multipasses de juntas espessas deve ser adotada uma técnica de oscilação sempre que possível após o passe de raiz. No entanto, cordões de solda muito largos ligando os dois lados do chanfro devem ser evitados.

A falta de fusão também pode ocorrer na forma de uma gota fria. Esse defeito é geralmente causado por uma velocidade de soldagem muito baixa na tentativa de se depositar uma camada em um único passe de solda. Entretanto, é muito frequentemente causado por uma tensão de soldagem muito baixa. Como resultado, a molhabilidade do cordão de solda fica ruim.

Na soldagem do alumínio, a causa mais comum desse tipo de defeito é a presença do óxido de alumínio, que é refratário e tem um ponto de fusão de aproximadamente 1.927°C, além de ser insolúvel no próprio alumínio. Se esse óxido estiver presente nas superfícies a serem soldadas, a fusão com o metal de solda será prejudicada.

A melhor proteção contra a formação de óxidos é removê-los imediatamente antes da soldagem.

Embora nos aços seja possível soldar sobre o óxido de ferro (ferrugem, carepa), uma quantidade excessiva desse óxido pode causar falta de fusão.

Mordedura

Como está ilustrado na Figura 54, a mordedura é um defeito que aparece como um entalhe no metal de base ao longo das bordas do cordão de solda. É muito comum em juntas em ângulo sobrepostas, porém pode também ser encontrada em juntas de topo e em ângulo. Esse tipo de defeito é mais comumente causado por parâmetros de soldagem inadequados, particularmente a velocidade de soldagem e a tensão do arco.

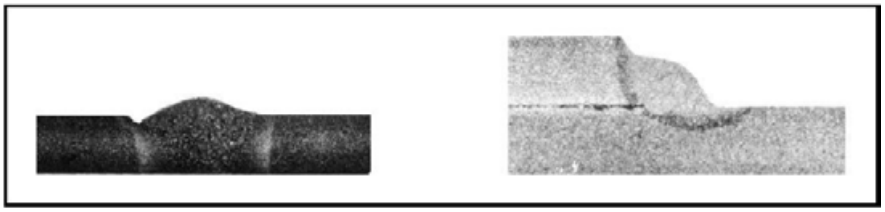


Figura 54 - Exemplos de mordedura

Quando a velocidade de soldagem é muito alta, o cordão de solda fica com uma crista por causa da solidificação extremamente rápida. As forças da tensão superficial arrastaram o metal fundido ao longo das margens do cordão de solda e empilharam-no ao longo de seu centro. As partes fundidas do metal de base são afetadas da mesma maneira. O entalhe da mordedura fica onde o metal de base fundido foi arrastado para a solda e não retornou devido à rápida solidificação. A diminuição da velocidade de soldagem reduzirá gradualmente o tamanho da mordedura e eventualmente eliminá-la-á. Quando estão presentes mordeduras pequenas ou intermitentes, aumentar a tensão do arco ou soldar empurrando podem ser ações corretivas eficazes. Em ambos os casos o cordão de solda ficará mais plano e a molhabilidade será melhor.

Entretanto, quando a tensão do arco é aumentada até níveis excessivos, a mordedura poderá aparecer novamente. Esse fato é particularmente verdadeiro no modo de transferência por aerossol. Quando o arco se torna muito longo, também se torna muito largo, que resulta num aumento da quantidade de metal de base fundido. No entanto, a transferência de calor de um arco longo é ruim, e assim, na realidade, o arco não está transferindo mais calor para a região da solda. As áreas mais externas se resfriam muito rapidamente e novamente não se consegue uma boa molhabilidade. O comprimento do arco deve ser mantido curto, não só para evitar mordeduras, mas também para aumentar a penetração e garantir a integridade da solda.

Correntes de soldagem excessivas também podem causar mordeduras. A força e o calor do arco e a penetração são tão grandes que o metal de base sob o arco é realmente "soprado" para fora. Mais uma vez, as áreas mais externas do metal de base são fundidas, mas se solidificam rapidamente. A turbulência da poça de fusão e a tensão superficial não permitem que a poça de fusão molhe adequadamente o metal de base. É sempre recomendável permanecer dentro das faixas de corrente especificadas para cada diâmetro de arame.

Porosidade

A porosidade consiste em poros de gás que podem ser encontrados na superfície ou no interior do cordão de solda solidificado. Como está ilustrado na Figura 55, esses poros podem variar em tamanho e são geralmente distribuídos numa forma aleatória. Entretanto, também é possível que a porosidade seja encontrada apenas no centro da solda.

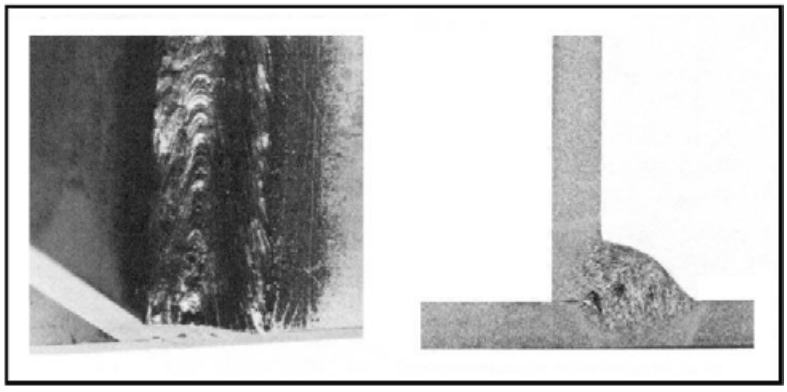


Figura 55 - Exemplos de porosidade

As causas mais comuns da porosidade são a contaminação atmosférica, excesso de oxidação nas superfícies das peças a serem soldadas, elementos de liga desoxidantes inadequados no arame e a presença de sujeira. A contaminação atmosférica pode ser causada por:

- vazão de gás de proteção insuficiente;
- vazão de gás de proteção excessiva, que pode causar aspiração de ar para dentro do fluxo do gás de proteção;
- bocais obstruídos ou sistema de fornecimento de gás danificado (mangueiras e conexões com vazamentos, etc.);
- correntes de ar excessivas na área da soldagem, que podem arrastar o gás de

proteção da região da poça de fusão.

Os gases atmosféricos que são primariamente responsáveis pela porosidade no aço são o nitrogênio e o oxigênio em excesso. No entanto, uma quantidade considerável de oxigênio pode ser tolerada sem gerar porosidade na ausência do nitrogênio. O oxigênio na atmosfera pode causar problemas graves com o alumínio por causa da rápida formação de óxidos. A vazão de gás deve ser inspecionada a intervalos regulares para assegurar que esteja livre de vazamentos. Adicionalmente, a umidade excessiva na atmosfera pode causar porosidade no aço e particularmente no alumínio. Sob climas úmidos deve ser tomado um cuidado especial. Por exemplo, tochas resfriadas continuamente a água podem apresentar condensação durante os períodos de alta umidade e consequentemente contaminar o gás de proteção.

A oxidação excessiva das peças é uma fonte óbvia de oxigênio, bem como a umidade aprisionada, particularmente para o alumínio. Revestimentos anodizados no alumínio devem ser removidos antes da soldagem porque podem conter água, bem como atuar como isolantes.

A porosidade pode também ser causada por uma desoxidação inadequada do arame de solda durante a soldagem de aços semiacalmados ou efervescentes. O oxigênio no aço pode causar porosidade por monóxido de carbono (CO) se os elementos desoxidantes adequados não estiverem presentes.

A sujeira orgânica pode ser uma fonte de porosidade. Um exemplo é o lubrificante excessivo no arame de solda. Esses hidrocarbonetos são fontes de hidrogênio, que é especialmente prejudicial ao alumínio.

Outras causas de porosidade podem ser taxas de solidificação da solda extremamente altas e características de arco errático. Quando as taxas de solidificação são muito altas, qualquer gás que normalmente escaparia fica aprisionado. Devem ser evitados velocidades de soldagem muito altas e valores de corrente muito baixos.

Características de arco errático podem ser causadas por condições de soldagem ruins (tensão muito baixa ou muito alta, transferência de metal ruim) e variação na velocidade de alimentação do arame. Todas essas ocorrências causam uma turbulência violenta na poça de fusão, que tende a romper a envoltória do gás de proteção e provoca a contaminação da poça de fusão pela atmosfera.

Trincas Longitudinais

Trincas longitudinais (ou de centro) do cordão de solda não frequentemente encontradas na soldagem MIG/MAG. Entretanto, essas trincas só podem ser de dois tipos: trincas a quente e trincas a frio. Trincas a quente típicas são ilustradas na Figura 56. Trincas a quente são aquelas que ocorrem enquanto o cordão de solda está entre as temperaturas de fusão (linha liquidus) e de solidificação (linha solidus). Nessa faixa de temperatura o cordão de solda está "pastoso". Trincas a quente normalmente resultam do uso de um arame de solda incorreto (particularmente em ligas de alumínio e de aço inoxidável). A composição química do metal de base também pode levar a esse defeito (um exemplo seria um fundido de aço inoxidável de alto carbono). Qualquer combinação de projeto de junta, condições e técnicas de soldagem que resulte num cordão de solda com uma superfície excessivamente côncava poderá conduzir à fissuração.

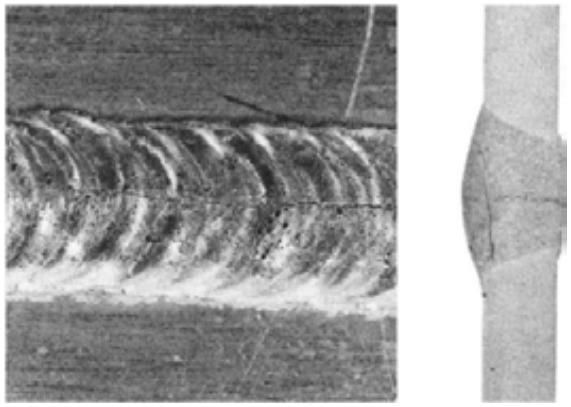


Figura 56 - Exemplo de trinca longitudinal

Uma forma desse defeito que pode ser encontrada frequentemente — particularmente com qualquer liga de alumínio série 5000 — é denominada trinca de cratera, que são pequenas trincas que aparecem no final do cordão de solda onde o arco foi interrompido. Embora pequenas, essas trincas são perigosas, pois podem se propagar para o interior do cordão de solda. Uma trinca de cratera está ilustrada na Figura 57. O principal motivo desse defeito é a técnica incorreta de terminar o cordão de solda. Para terminar corretamente um cordão de solda, a cratera deve ser preenchida, o que pode ser feito retornando com o arco antes de interrompê-lo (veja a Figura 58). Adicionalmente, se o controle de soldagem for programado para fornecer gás de proteção por um curto período de tempo após a interrupção do arco, a cratera deve ser protegida até que esteja completamente solidificada.

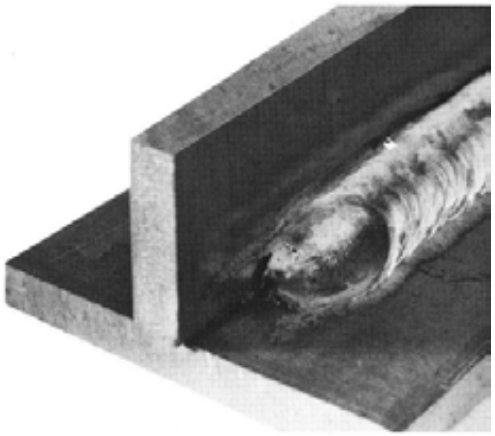


Figura 57 - Exemplo de trinca de cratera

Trincas que sucedem após o cordão de solda estar completamente solidificado são denominadas trincas a frio, que podem ocorrer quando a seção reta do cordão solda é muito pequena para suportar as tensões atuantes envolvidas ou mesmo devido à presença de hidrogênio difusível, principalmente na soldagem de aços ligados, dentre outras causas.

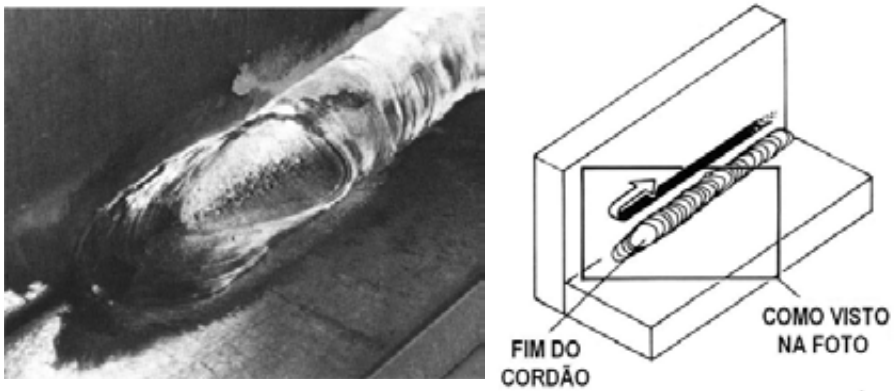


Figura 58 - Técnica de enchimento de trinca de cratera

Como um guia de referência rápida, a Tabela XXI lista todos os defeitos possíveis, suas causas e ações corretivas.

DEFEITO	CAUSA E/OU AÇÃO CORRETIVA
Porosidade	▪ Óleo, oxidação grosseira, carepa, etc. ▪ Arame - pode ser necessário um arame com teores mais altos de Mn e Si. ▪ Problema de proteção: vento, bocal obstruído ou pequeno, mangueira de gás danificada, vazão de gás excessiva, etc. ▪ Falha na remoção da escória vítrea entre os passes de solda. ▪ Soldagem sobre a escória de eletrodo revestido.
Falta de penetração	▪ Junta de solda muito estreita. ▪ Corrente de soldagem muito baixa; extensão do eletrodo muito grande. ▪ Poça de fusão passando à frente do arco.
Falta de fusão	▪ Tensão e/ou corrente de soldagem muito baixa. ▪ Polaridade errada; deveria ser CC+. ▪ Velocidade de soldagem muito baixa. ▪ Soldagem sobre um cordão convexo. ▪ Oscilação da tocha muito larga ou muito estreita. ▪ Oxidação excessiva na chapa.
Mordedura	▪ Velocidade de soldagem muito alta. ▪ Tensão de soldagem muito alta. ▪ Corrente de soldagem excessiva. ▪ Parada insuficiente às margens do cordão de solda.
Trincas	▪ Composição química incorreta do arame de solda. ▪ Cordão de solda muito pequeno. ▪ Má qualidade do material de base sendo soldado.
Arco instável	▪ Verifique o gás de proteção. ▪ Verifique o sistema de alimentação de arame.
Início do cordão deficiente ou quebra do arame	▪ Tensão de soldagem muito baixa. ▪ Indutância muito alta. ▪ Extensão do eletrodo muito grande. ▪ Limpe a escória vítrea ou a oxidação do metal de base.
Respingos excessivos	▪ Use misturas Ar-CO2 ou Ar-O2 no lugar de CO2. ▪ Diminua o percentual de He. ▪ Tensão do arco muito baixa. ▪ Aumente a indutância.
Furo da raiz	▪ Corrente de soldagem muito alta. ▪ Velocidade de soldagem muito baixa. ▪ Diminua a abertura da raiz ▪ Use misturas Ar-CO2 no lugar de CO2.
Convexidade do cordão de solda	▪ Tensão do arco ou corrente de soldagem muito baixa. ▪ Extensão do eletrodo excessiva. ▪ Aumente a indutância. ▪ Polaridade errada; deveria ser CC+. ▪ Junta de solda muito estreita.

Tabela XXI - Defeitos de solda - suas causas e soluções

Capítulo 10

SOLDAGEM MIG/MAG PONTUAL

A soldagem MIG/MAG pontual (MIG/MAG spot welding), embora algumas vezes considerada como uma ferramenta de ponteamento, conquistou larga aceitação como um método de união que é competitivo com o rebitamento e com a soldagem pontual por resistência (resistance spot welding). Em algumas aplicações, esse processo substituiu alguns processos de soldagem contínuos, na medida em que reduziu custos da soldagem e manteve a reprodutibilidade e a resistência adequada para as necessidades de serviço, requerendo também uma habilidade mínima do operador. Aços de baixo carbono, aços inoxidáveis e o alumínio são frequentemente soldados por este método.

Descrição do processo

A soldagem MIG/MAG pontual (MIG/MAG spot welding), uma variação do processo MIG/MAG contínuo, funde duas peças de pequena espessura fazendo penetrar completamente uma das peças na outra. Não é necessária preparação da junta a não ser a limpeza apenas na área de sobreposição das duas peças. Entretanto, peças de espessura acima de 6,5 mm geralmente necessitam de um furo no topo da chapa, sendo conhecidas como soldas tampão (plug welds). A Figura 59 mostra um exemplo típico de soldagem MIG/MAG pontual.

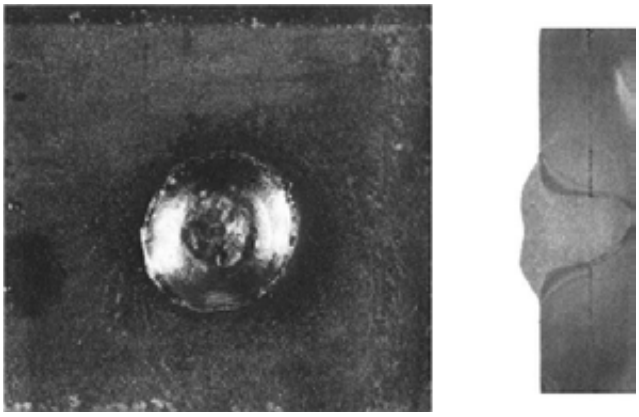


Figura 59 - Solda pontual típica - aço carbono

Essas técnicas baseiam-se nos mesmos princípios da soldagem MIG/MAG contínua, à exceção que não há velocidade de soldagem envolvida; em vez disso, existe um intervalo de tempo de soldagem. A solda é realizada colocando-se a tocha diretamente no topo da chapa e mantendo-a sem movimento como está ilustrado na Figura 60. Quando o gatilho da tocha for pressionado, o arame de solda e o gás de proteção serão alimentados continuamente. O arco será mantido por um período de tempo predeterminado e continuará a penetrar no material em apenas um local. Finalmente a solda penetrará também na chapa de baixo. A penetração alcançada para um material em particular é determinada primeiramente pela corrente de soldagem e pela duração do arco. A relação é ilustrada na Figura 61 para chapas de aço de baixo carbono de espessuras 1,6 mm, 3,2 mm, 4,8 mm e 6,5 mm. Observe que a corrente de soldagem possui de longe a maior influência na penetração.

Figura 60 - Técnica de execução de uma solda pontual

Depois de decorrido o tempo de soldagem, cessa a alimentação do arame, a fonte corta a energia e o arco é interrompido. No entanto, o gás de proteção deve continuar a fluir até o metal de solda se solidificar. Como a soldagem é realizada numa chapa plana, o metal de adição forma um reforço convexo no topo da chapa.

A soldagem MIG/MAG pontual é mais comumente utilizada na posição plana. Em chapas finas (16 MSG) as soldas podem ser executadas na posição vertical e na sobrecabeça.

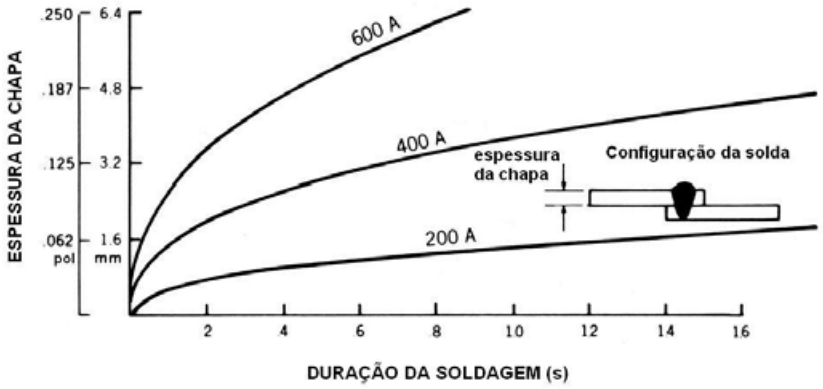


Figura 61 - Efeito da corrente de soldagem e tempo de penetração - soldagem MIG/MAG pontual de aços de baixo carbono

Necessidades de equipamento

A maioria dos controles de soldagem MIG/MAG é produzida atualmente com dispositivos de controle de duração do arco, vazão do gás de proteção, e controle antiaderente (anti-stick). O controle do tempo de duração do arco estabelece o período de tempo no qual o arco permanecerá realmente aberto. O controle pós-fluxo é necessário para regular o fluxo de gás depois que o arco tiver sido interrompido. É importante que o cordão de solda pontual seja protegido durante o tempo de solidificação. O ajuste de um controle antiaderente (anti-stick) permite que a fonte continue a funcionar por um curto intervalo de tempo depois que o motor alimentador de arame parar, de modo

a promover a queima do arame por um comprimento predeterminado. Isso evita que o arame agarre na poça de fusão quando a solda estiver terminada.

A única novidade no sistema de soldagem é um bocal diferente. Como está ilustrado na Figura 62, esse bocal é mais longo que o normalmente empregado na soldagem MIG/MAG contínua, e é necessário que seja assim mais longo porque a solda é feita dentro dele. As fendas são necessárias para permitir a saída dos gases quentes. Bocais para a soldagem MIG/MAG pontual encontram-se disponíveis em diferentes tamanhos. Com o aumento da espessura das chapas aumenta também o tamanho do cordão de solda e, consequentemente, o tamanho do bocal também deve ser aumentado.

Figura 62 - Comparação entre o bocal normal e o bocal para a soldagem MIG/MAG pontual

Consumíveis – gás de proteção e arames

Os gases de proteção e os arames empregados na soldagem MIG/MAG pontual são os mesmos da soldagem MIG/MAG contínua. Veja o Capítulo 4 e o Capítulo 5 para as recomendações específicas. No entanto, na soldagem MIG/MAG pontual de aços de baixo carbono, é mais importante agora empregar um arame que contenha mais compostos desoxidantes. Como os tempos de soldagem podem ser mais curtos que 0,3 s, a solidificação do cordão de solda é extremamente rápida. O arame deve conter desoxidantes para assegurar que o ponto de solda depositado seja íntegro.

Condições de Soldagem

A Tabela XXII e a Tabela XXIII listam as condições de soldagem MIG/MAG pontual para aços de baixo carbono e alumínio. Além disso, as soldas com aços inoxidáveis podem ser executadas em condições similares às da Tabela XXII. No entanto, devem ser empregados o gás de proteção e o arame de solda adequados. Essas condições devem servir apenas como ponto de partida.

Resistência ao cisalhamento

A resistência ao cisalhamento de uma solda pontual para uma determinada composição química é diretamente proporcional à área do ponto de solda na interface das duas chapas sendo soldadas. A Figura 63 ilustra duas soldas pontuais feitas em aço doce. Ambas as soldas foram realizadas com o mesmo gás de proteção e com o mesmo arame de solda, mas sob diferentes condições de soldagem. Observe que um cordão apresenta menor penetração e uma área de seção reta do cordão de solda menor na interface. Esta solda possui uma resistência ao cisalhamento cerca de 500 kg menor que a solda com penetração total.

Tamanho do ponto (mm)	Arame (mm)	Corrente (A)	Tensão (V)	Duração do arco (s)
1,5	1,2	250 200	34,0 33,0	0,5 1,0
1,9	1,2	275 225	34,5 33,5	0,5 1,0
2,3	1,2	315 250	35,0 34,0	0,5 1,0
2,7	1,6	390 325	34,0 33,5	0,5 1,0
3,3	1,6	450 365	35,0 34,0	0,5 1,0
4,8	1,6	565 460	38,0 35,0	0,5 1,0
6,4	2,4 1,6	660 575	37,0 38,0	0,5 1,0

Tabela XXII - Condições de soldagem pontual para aços de baixo carbono

Numa solda pontual de penetração total numa determinada espessura, a área da interface dependerá principalmente do gás de proteção e da tensão do arco. Soldas pontuais em aços de baixo carbono, por exemplo, exibirão a área máxima na interface se for empregado como gás de proteção do dióxido de carbono (CO_2) e se a tensão do arco for aumentada até um nível logo abaixo do ponto em que a poça de fusão torna-se excessivamente turbulenta. A Tabela XXIV lista valores típicos de resistência ao cisalhamento para a soldagem pontual de aços de baixo carbono e de alumínio. Observe que variações na condição de superfície da peça, na fixação e na tensão do arco podem modificar significativamente a resistência ao cisalhamento.

Tamanho do ponto (mm)	Arame (mm)	Corrente (A)	Tensão (V)	Duração do arco (s)
1,6	1,6	170 125	26,0 27,0	1,0 1,5
2,4	1,6	230 210	28,0 28,0	1,0 1,5
3,2	1,6	280 265	30,0 30,0	1,0 1,5
4,8	1,6	330 310	28,0 27,0	1,0 1,5
6,4	1,6	440 415	30,0 29,0	1,0 1,5

Gás de proteção: He-75 Arame de solda: ER4043

Tabela XXIII - Condições de soldagem pontual para o alumínio

Figura 63 - Resistência ao cisalhamento - soldas pontuais em aço doce

Aço carbono - arame ER70S-4, gás de proteção CO_2

Espessura da chapa (mm)	Resistência média ao cisalhamento (kg)
0,8	410
1,2	760
1,6	820
1,9	1180
2,7	1500
3,3	1950
4,5	2270
6,4	3080

Alumínio (6061-T6) - arame 4043, gás de proteção HE-75

Espessura da chapa (mm)	Resistência média ao cisalhamento (kg)
0,8	90
1,6	170
2,4	250
3,2	340
4,8	520
6,4	680

Tabela XXIV - Níveis típicos de resistência ao cisalhamento da soldagem pontual

BIBLIOGRAFIA

• ESAB MIG Welding Handbook – ESAB Welding & Cutting Products
• COMPARAÇÃO ENTRE SOLDAGEM ROBOTIZADA COM ARAME SÓLIDO E “METAL CORED”
• A OCORRÊNCIA DO “FINGER”, Welerson Reinaldo de Araújo, Dissertação de Mestrado, UFMG, fev/2004
• MIG/MAG Welding, Svetsaren, vol. 58, no 2, 2003

Belo Horizonte – MG vendas_bh@esab.com.br
São Paulo – SP vendas_sp@esab.com.br
Rio de Janeiro – RJ vendas_rj@esab.com.br
Porto Alegre – RS vendas_pa@esab.com.br
Salvador - BA vendas_sa@esab.com.br

FORTE COM VOCÊ
www.esab.com.br